RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 17/12/2017.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL

TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS DE SUINOCULTURA EM REATORES ANAERÓBIOS HORIZONTAIS DE ALTA TAXA SEGUIDOS DE FILTRO BIOLÓGICO PERCOLADOR

Daiana Camila da Silva
Tecnóloga em Biocombustíveis

2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL

TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS DE SUINOCULTURA EM REATORES ANAERÓBIOS HORIZONTAIS DE ALTA TAXA SEGUIDOS DE FILTRO BIOLÓGICO PERCOLADOR

Daiana Camila da Silva

Orientador: Prof. Dr. Roberto Alves de Oliveira

Co-orientadora: Profa. Dra. Rose Maria Duda

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do Título de Mestre em Microbiologia Agropecuária

2015

Silva, Daiana Camila da
S586t Tratamento de águas residuárias de suinocultura em reatores anaeróbios horizontais de alta taxa seguidos de filtro biológico percolador / Daiana Camila da Silva. – – Jaboticabal, 2015
xiv, 117 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2015
Orientador: Roberto Alves de Oliveira
Coorientadora: Rose Maria Duda
Banca examinadora: Ariovaldo José da Silva, Luciano Santos Rodrigues
Bibliografia

1. Arqueias metanogênicas. 2. Dejetos de suínos. 3. Digestão anaeróbia. 4. Hidrodinâmica dos reatores horizontais. 5. Produção de metano. 6. Remoção de DQO. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 628.16

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Daiana Camila da Silva – nascida em Matão, no Estado de São Paulo, no dia 21 de dezembro de 1991. Graduada em Tecnologia em Biocombustíveis pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP, Campus Matão - SP, em julho de 2013. Realizou iniciação tecnológica de 2011 a 2013, na qual foi bolsista pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação – PIBITI, financiada pelo CNPq. Em agosto de 2013 iniciou mestrado em Microbiologia Agropecuária, na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, da UNESP, Campus de Jaboticabal - SP.

“Eu tentei 99 vezes e falhei, mas na centésima tentativa eu consegui, nunca desista de seus objetivos mesmo que esses pareçam impossíveis, a próxima tentativa pode ser a vitoriosa”.

(Albert Einstein)

O Senhor é o único Deus;
Somente Deus é nossa rocha.
Ele é o Deus que me dá forças
e me protege aonde quer que eu vá.
Ele não me deixa tropeçar
e me põe a salvo nas montanhas.
(Salmo 18. 31-33)

AGRADECIMENTOS

O meu maior agradecimento vai para Deus, que tornou tudo isso possível.

Agradeço sinceramente a todos que me ajudaram, direta ou indiretamente na realização deste trabalho. Sei que me esquecerei de tantos que neste período me ajudaram, mas saibam que todos estão em meu coração, obrigada!

Agradeço em especial:

Ao meu orientador Prof. Dr. Roberto Alves de Oliveira, pela orientação competente e segura, pela oportunidade de realização do curso de Pós-Graduação ao nível de Mestrado, pelas contribuições e pela confiança depositada.

À Professora Dra. Rose Maria Duda, pela co-orientação, pelas inúmeras contribuições, pela eterna paciência, amizade, convivência, pela incansável e insubstituível ajuda.

Aos Professores Dr. Luciano Santos Rodrigues da Universidade Federal de Minas Gerais e ao Prof. Dr. Ariovaldo José da Silva da Universidade Estadual de Campinas pela nobre participação na Banca de Defesa, disponibilidade e grandiosas contribuições a este estudo. Foi uma honra recebê-los.

Ao Professor Dr. Ruben Pablo Schocken-Iturrino e a Dra. Juliana da Silva Vantini pela participação no Exame Geral de Qualificação e principalmente pelas valiosas contribuições a este estudo e imensa atenção dispensada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela concessão da bolsa de mestrado para o desenvolvimento deste estudo.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Microbiologia Agropecuária da UNESP – FCAV, pelas disciplinas ministradas e pelo aprimoramento acadêmico.

Aos Funcionários e alunos de Pós-Graduação do Departamento de Suinocultura: Wilson, Zé, Cintia e Luan pela imensa ajuda durante todo o experimento, convivência e amizade.

Aos Funcionários do Departamento de Engenharia Rural: Davi, Luis Cláudio, Marquinho, Maranhão, Tiãozinho, Silvia e Lúcia pela amizade, convivência, conselhos e auxílios prestados.

Em especial, ao funcionário Ailton Crispin da Silva, por me ajudar a operar os reatores, coletar as amostras durante o período do experimento, pelos conselhos, apoio, momentos de alegria e a imensa amizade.

Aos queridos amigos de laboratório: Aureo, Daniele, Juliana, Luan, Valciney e Wilmar, pela amizade, apoio, conselhos e pelos momentos de descontração. Sentirei muita saudade de vocês!

Aos amigos de Laboratório que conhecido durante o Mestrado: Alejandra, Maria Laura, Antonio, Maiara, Isabela, Alexandre, Gilvania, Guilherme, Cínthia, Eduardo e Luana, pela convivência e amizade.

As amigas de apartamento: Raissa, Mariana, Juliana, Cinthia, Viviane e Beatriz, pela convivência durante minha moradia em Jaboticabal, pelo apoio, amizade e momentos de muita alegria.

A amiga Helenice da Unesp de Araçatuba pela valiosa amizade, apoio, conselhos, momentos de muita alegria e descontração.

Aos amigos que tive o privilégio de conhecer durante minha vivência em Jaboticabal: Vitor, Elizabeth, Milena, Thaisa e Cássio, pelo apoio, carinho e amizade.

As amigas de Graduação: Letícia, Regiane e Ana Larissa, pelo apoio e amizade.

Ao corpo docente do IFSP – Campus Matão, em especial aos professores: Márcia, Carol Lourencetti, Carol Pigatto, Sandro, Flávio e Danilo pelos ensinamentos, pela amizade e incentivo ao prestar o mestrado.

Ao Prof. Dr. José Marcos (orientador da graduação) e ao aluno Éberton Gustavo (IFSP-Matão), pelo imenso incentivo e apoio na realização do Mestrado, e também pelo carinho e amizade.

Aos irmãos e amigos da Segunda Igreja Presbiteriana de Jaboticabal, em especial ao pastor Everton e sua esposa Clarissa, pelos ensinamentos, apoio, compreensão e amizade.

Aos meus pais, Edna e Jesus Camilo, pelo incentivo, confiança que sempre depositaram em mim e por entender minhas dificuldades e anseios, obrigada!

Aos meus irmãos Luiz e Jesus Junior, pelo apoio, carinho, amor e estímulo.

Muitíssimo obrigado a todos pela disposição e carinho para que este estudo fosse realizado.

SUMÁRIO

Página

LISTA DE ABREVIATURAS ..... **iii**
LISTA DE TABELAS ..... **iv**
LISTA DE FIGURAS ..... **viii**
RESUMO ..... **xiii**
Palavras-chave: ..... **xiii**
ABSTRACT ..... **xiv**
Keywords ..... **xiv**
1. INTRODUÇÃO **15**
2. OBJETIVO **17**
2.1 Objetivos específicos 17
3. REVISÃO DE LITERATURA **17**
3.1. Características das águas residuárias de suinocultura e os impactos aos ecossistemas 17
3.2. Tratamento anaeróbio de águas residuárias 19
3.3 Reator anaeróbio horizontal de alta taxa com manta de lodo e leito fixo 22
3.4 Meio suporte para retenção da biomassa microbiana 26
3.5 Hidrodinâmica de reatores anaeróbios 27
3.6 Pós-tratamento 28
3.6.1 Filtro biológico percolador 28
3.7 Biofilmes 31
4. MATERIAL E MÉTODOS **33**
4.1. Local do experimento 33
4.2. Instalações experimentais 33
4.3. Pós – tratamento: filtro biológico percolador (FBP) e sedimentador (S) 36
4.4. Afluente 39
4.5. Descrição da operação do sistema de tratamento 40
4.6 Exames físicos e determinações de constituintes orgânicos e inorgânicos nos afluentes, efluentes, lodo e biogás. 41
4.7 Produção de biogás 42
4.8 Temperatura do ar 43
4.9 Ensaio de hidrodinâmica 43
4.10 Análise estatística 46
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO **47**

5.1 Temperatura **47**
5.2. Demanda química de oxigênio (DQO) **48**
5.2.1 Demanda química de oxigênio no sistema de tratamento anaeróbio **48**
5.2.2 Demanda química de oxigênio no sistema de pós-tratamento **53**
5.3 Sólidos suspensos totais e voláteis **56**
5.3.1 Sólidos suspensos totais e voláteis no sistema de tratamento anaeróbio **56**
5.3.2 Sólidos suspensos totais e voláteis no sistema de pós-tratamento **59**
5.4 Produção e composição de biogás **61**
5.5 pH, Alcalinidade e ácidos voláteis totais **63**
5.5.1 pH, alcalinidade e ácidos voláteis totais no sistema de tratamento anaeróbio **63**
5.5.2 pH, alcalinidade e ácidos voláteis totais no sistema de pós-tratamento **67**
5.6 Sólidos totais (ST) e voláteis (SV) do lodo **70**
5.6.1 Taxa de carregamento de lodo (TCL) e tempo de retenção de sólidos (TRS) nos reatores anaeróbios horizontais de alta taxa 75
5.7 Teores de macronutrientes e micronutrientes no afluente e efluente **77**
5.7.1 Nitrogênio Kjeldahl (NK) e nitrogênio amoniacal (N-am) no afluente e efluentes do sistema de tratamento anaeróbio e pós-tratamento **77**
5.7.2 Fósforo **83**
5.7.2.1 P-total no sistema de tratamento anaeróbio e pós-tratamento. **83**
5.7.3 Cálcio (Ca), Potássio (K), Magnésio (Mg) e Sódio (Na) **86**
5.7.3.1 Cálcio, Potássio, Magnésio e Sódio no sistema de tratamento anaeróbio. **86**
5.7.3.2 Cálcio, Potássio, Magnésio e Sódio no sistema de pós-tratamento (filtro biológico percolador e sedimentador) **88**
5.7.4 Manganês (Mn), Ferro (Fe), Cobre e Zinco **89**
5.7.4.1 Manganês, Ferro, Cobre e Zinco no sistema de tratamento anaeróbio. **89**
5.7.4.2 Manganês, Ferro, Cobre e Zinco no sistema de pós-tratamento (filtro biológico percolador e sedimentador) **92**
5.8 Coliformes totais e termotolerantes **94**
5.8.1 Coliformes totais e termotolerantes no sistema de tratamento anaeróbio **94**
5.8.2 Coliformes totais e termotolerantes no sistema de pós-tratamento **95**
5.9. Perfil espacial nos reatores anaeróbios horizontais **97**
5.10 Ensaio de hidrodinâmica **101**
6. CONCLUSÃO **105**
7. REFERÊNCIAS **107**

LISTA DE ABREVIATURAS

AI - Alcalinidade intermediária

AP - Alcalinidade parcial

AT - Alcalinidade total

AVT - Ácidos voláteis totais

CH_4 - metano

COV - carga orgânica volumétrica

CSTR – tanques de mistura completa em série

CV - Coeficiente de variação

DQO - Demanda química de oxigênio

DQOdiss - Demanda química de oxigênio dissolvida

DTR – distribuição do tempo de residência

E – eficiência de remoção

EPS - extracellular polymeric substances

FBP – filtro biológico percolador

N- número de tanques em série

N-am.- nitrogênio amoniacal

N-org – nitrogênio orgânico

NTK- nitrogênio total Kjehdal

NO_2^- - nitrito

NO_3^- - nitrato

NMP – número mais provável

OD – oxigênio dissolvido

PVM – produção volumétrica de metano

PEM – produção específica de metano

P – ponto de coleta

P-total - fósforo total

pH - Potencial hidrogeniônico

Qs – taxa de aplicação hidráulica superficial

RAHML – Reator anaeróbio horizontal de manta de lodo

RAHLF – Reator anaeróbio horizontal de leito fixo

S - Sedimentador

ST - Sólidos totais

SV - Sólidos voláteis

SST - Sólidos suspensos totais

SSV - Sólidos suspensos voláteis

t – tempo de detenção hidráulico médio

TDH - Tempo de detenção hidráulico

TCL- taxa de carregamento de lodo

TRS- tempo de retenção de sólidos

V- velocidade superficial de fluxo

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1. Trabalhos realizados com reatores anaeróbios horizontais de alta taxa no tratamento de águas residuárias. 25

Tabela 2. Condições operacionais do sistema de tratamento composto pelos reatores anaeróbios horizontais (R1, R2, R3 e R4) seguido do filtro biológico percolador (FBP) e sedimentador (S). 40

Tabela 3. Exames físicos e determinações de constituintes orgânicos e inorgânicos nos afluentes, efluentes, lodo e biogás dos reatores anaeróbios horizontais em série e do filtro biológico percolador, seguido do sedimentador. 41

Tabela 4. Resultados das equações para o preparo da solução de NaCl. 44

Tabela 5. Valores médios das temperaturas do ar observadas na Estação Agroclimatológica do Campus de Jaboticabal, durante a operação do sistema de tratamento anaeróbio e pós-tratamento. 47

Tabela 6. Valores médios e coeficiente de variação (c.v) da carga orgânica volumétrica (COV) e da demanda química de oxigênio total (DQOtotal), demanda química de oxigênio dissolvida (DQOdiss) e demanda química de oxigênio sólidos suspensos (DQOss) no afluente e nos efluentes e respectivas eficiências de remoção (E) nos reatores anaeróbios horizontais em série (R1, R2, R3 e R4), durante os ensaios 1, 2 e 3. 49

Tabela 7. Valores médios da carga orgânica volumétrica (COV), da demanda química de oxigênio total (DQOtotal), demanda química de oxigênio dissolvida (DQOdiss) e demanda química de oxigênio de sólidos suspensos (DQOss) nos efluentes e respectivas eficiências de remoção (E) no filtro biológico percolador (FBP), sedimentador (S) e no sistema anaeróbio/aeróbio (R1+R2+R3+R4+FBP+S). 54

Tabela 8. Valores médios de sólidos suspensos totais (SST) e sólidos suspensos voláteis (SSV) no afluente e efluente dos reatores

anaeróbios horizontais, e as eficiências de remoção dos reatores R1, R2, R3 e R4 e no sistema de tratamento anaeróbio (R1+R2+R3+R4) nos ensaios 1, 2 e 3. 56

Tabela 9. Valores médios de sólidos suspensos totais (SST) e sólidos suspensos voláteis (SSV) no afluente e nos efluentes e respectivas eficiências de remoção (E) no filtro biológico percolador (FBP), sedimentador (S) e no sistema anaeróbio/aeróbio (R1+R2+R3+R4+FBP+S),nos ensaios 1a 3. 59

Tabela 10. Valores médios e coeficientes de variação (c.v. %) do percentual de metano no biogás, produção volumétrica de metano e produção específica de metano, durante a operação dos reatores anaeróbios horizontais, instalados em série. 61

Tabela 11. Valores médios de pH, alcalinidade total (AT), parcial (AP) e intermediária (AI), relação de AI/AP e ácidos voláteis totais (AVT). 64

Tabela 12. Valores médios de pH, alcalinidade total (AT), parcial (AP) e intermediária (AI), a relação AI/AP e ácidos voláteis totais (AVT), no efluente do filtro biológico percolador (FBP) e sedimentador (S). 67

Tabela 13. Valores médios de sólidos totais (ST) e voláteis (SV) e os respectivos coeficientes de variação (c.v.), do lodo do reator anaeróbio horizontal (R1). 70

Tabela 14. Valores médios de sólidos totais (ST) e voláteis (SV) e os respectivos coeficientes de variação (c.v.), do lodo do reator anaeróbio horizontal (R2). 71

Tabela 15. Valores médios de sólidos totais (ST) e voláteis (SV) e os respectivos coeficientes de variação (c.v.), do lodo do reator anaeróbio horizontal (R3). 72

Tabela 16. Valores médios de sólidos totais (ST) e voláteis (SV) e os respectivos coeficientes de variação (c.v.), do lodo do reator anaeróbio horizontal (R4). 72

Tabela 17. Valores médios e os coeficientes de variação (c.v.) da taxa de carregamento do lodo (TCL) (g DQO (g SV d)$^{-1}$) e tempo de retenção de sólidos (TRS) (d) nos reatores anaeróbios horizontais em série. 75

Tabela 18. Valores médios da concentração de nitrogênio Kjeldahl (NK), nitrogênio amoniacal (N- am) no afluente e efluentes dos reatores anaeróbios horizontais e pós-tratamento e eficiência de remoção de NK no R1, R2, R3 e R4 seguidos do filtro biológico percolador (FBP) e sedimentador (S) 77

Tabela 19. Valores médios e coeficientes de variação (c.v.) das concentrações de oxigênio dissolvido (OD), nitrato (N-NO_3^-), nitrito (N-NO_2^-) e nitrogênio total (NT), e das eficiências de remoção (E) de nitrogênio total (NT) obtidos no sistema de tratamento anaeróbio (R4) e o pós-tratamento composto por filtro biológico percolador (FBP) e sedimentador (S). 80

Tabela 20. Valores médios da concentração de fósforo (P-total) no afluente e efluente dos reatores anaeróbios horizontais seguidos do filtro biológico percolador (FBP) e sedimentador (S) e eficiências de remoção dos reatores e do sistema de pós-tratamento e do sistema anaeróbio/aeróbio.....84

Tabela 21. Valores médios e coeficientes de variação (CV) das concentrações de cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg) e de sódio (Na), no afluente e efluentes, e das eficiências de remoção (E) dos reatores anaeróbios horizontais e do sistema de tratamento anaeróbio (R1+R2+R3+R4). 87

Tabela 22. Valores médios e coeficientes de variação (CV) das concentrações de cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg) e de sódio (Na), do efluente, e eficiências de remoção (E) do filtro biológico percolador (FBP) , sedimentador (S) e sistema de tratamento anaeróbio/aeróbio.....88

Tabela 23. Valores médios e coeficientes de variação (CV) das concentrações de manganês (Mn), ferro (Fe), cobre (Cu) e de zinco (Zn), no afluente e efluentes, e das eficiências de remoção (E) dos reatores anaeróbios horizontais e do sistema de tratamento anaeróbio (R1+R2+R3+R4). 90

Tabela 24. Valores médios e coeficientes de variação (CV) das concentrações de manganês (Mn), ferro (Fe), cobre (Cu) e de zinco (Zn), do efluente, e eficiências de remoção (E) do filtro biológico percolador (FBP), sedimentador (S) e sistema de tratamento anaeróbio/aeróbio.....93

Tabela 25. Valores médios do número mais provável (NMP/100 mL) de coliformes totais e termotolerantes no afluente e efluentes, e respectivas eficiências de remoção no sistema de tratamento reatores anaeróbios horizontais em série (R1, R2, R3 e R4). 95

Tabela 26. Valores médios do número mais provável (NMP/100 mL) de coliformes totais e termotolerantes nos efluentes, e respectivas eficiências de remoção no sistema de pós-tratamento (FBP e Sedimentador). 96

Tabela 27. Valores dos parâmetros de ajuste dos modelos de tanques em série, às curvas experimentais, utilizando o NaCl como traçador, nos reatores anaeróbios horizontais, R1, R2, R3 e R4. 103

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1. Etapas do processo de digestão anaeróbia na formação de metano (Adaptado de CHERNICHARO, 2007). 20

Figura 2. Processos envolvidos na formação e crescimento de biofilmes (XAVIER et al., 2002). 31

Figura 3. Representação esquemática de um biofilme (GONÇALVES, 2001). 32

Figura 4. Representação esquemática das instalações experimentais do sistema de tratamento anaeróbios em série composto por um reator anaeróbio horizontal de manta de lodo (R1) e três reatores anaeróbios horizontais de leito fixo (R2, R3 e R4). 34

Figura 5. Foto das instalações experimentais do sistema de tratamento anaeróbio composto por reatores anaeróbios horizontais de manta de lodo (R1) e de leito fixo (R2, R3 e R4)..... 34

Figura 6. Fotos dos anéis de eletroduto corrugado (conduíte) utilizados como meio suporte nos reatores anaeróbios horizontais de leito fixo e no filtro biológico percolador nos ensaios 1, 2 e 3..... 35

Figura 7. Foto das instalações experimentais do sistema de pós – tratamento composto filtro biológico percolador (FBP) seguido do sedimentador (S)..... 36

Figura 8. Representação esquemática das instalações experimentais do sistema de pós - tratamento composto pelo filtro biológico percolador (FBP) e sedimentador (S)..... 37

Figura 9. Foto da chapa de aço inox para apoio do meio suporte..... 38

Figura 10. Foto do sistema de distribuição de efluente do filtro biológico percolador utilizando uma placa perfurada de PVC. 39

Figura 11. Valores médios das temperaturas do ar máximas, médias e mínimas, durante a operação do sistema de tratamento anaeróbio em série com reatores horizontais e pós-tratamento, nos ensaios 1, 2 e 3. 47

Figura 12. Valores da demanda química de oxigênio total (DQOtotal) no afluente, nos reatores anaeróbios horizontais em série (R1, R2, R3 e R4).....50

Figura 13. Valores da demanda química de oxigênio total (DQOtotal) nos efluentes dos reatores anaeróbios horizontais em série (R1, R2, R3 e R4).....51

Figura 14. Valores da demanda química de oxigênio dissolvida (DQOdiss) no afluente, nos reatores anaeróbios horizontais em série (R1, R2, R3 e R4).....51

Figura 15. Valores da demanda química de oxigênio dissolvida (DQOdiss) nos efluentes dos reatores anaeróbios horizontais em série (R1, R2, R3 e R4).....52

Figura 16. Valores da demanda química de oxigênio total (DQOtotal) nos efluentes do filtro biológico percolador e sedimentador.....55

Figura 17. Valores da demanda química de oxigênio dissolvida (DQOdiss) no efluente do filtro biológico percolador e sedimentador. 55

Figura 18. Valores médios das eficiências de remoção de demanda química de oxigênio total (DQO total) dos reatores anaeróbios horizontais seguidos do filtro biológico percolador (FBP) e sedimentador (S).....55

Figura 19. Concentrações de sólidos suspensos totais (SST) no afluente, nos reatores anaeróbios horizontais em série (R1, R2, R3 e R4). 57

Figura 20. Concentrações de sólidos suspensos totais (SST) nos efluentes dos reatores anaeróbios horizontais em série (R1, R2, R3 e R4). 58

Figura 21. Concentrações de sólidos suspensos voláteis (SSV) no afluente, dos reatores anaeróbios horizontais em série (R1, R2, R3 e R4). 58

Figura 22. Concentrações de sólidos suspensos voláteis (SSV) nos efluentes dos reatores anaeróbios horizontais em série (R1, R2, R3 e R4). 58

Figura 23. Concentrações de sólidos suspensos totais (SST) no efluente do filtro biológico percolador (FBP) e sedimentador (S).....59

Figura 24. Concentrações de sólidos suspensos voláteis (SSV) no efluente do filtro biológico percolador e sedimentador. 60

Figura 25. Valores médios das eficiências de remoção de sólidos suspensos totais (SST) dos reatores anaeróbios horizontais seguidos do filtro biológico percolador (FBP) e sedimentador (S). 60

Figura 26. Valores médios da produção volumétrica de metano para o reator anaeróbio horizontal (R1) e o sistema R1+R2+R3+R4. 62

Figura 27. Valores de pH no afluente e efluentes dos reatores anaeróbios horizontais em série (R1, R2, R3 e R4). 64

Figura 28. Alcalinidade parcial (AP) do afluente e dos efluentes dos reatores anaeróbios horizontais em série (R1, R2, R3 e R4). 65

Figura 29. Valores da relação alcalinidade parcial e intermediária (AI/AP), dos efluentes dos reatores anaeróbios horizontais em série (R1, R2, R3 e R4). 66

Figura 30. Valores dos ácidos voláteis totais (AVT) do afluente e dos efluentes dos reatores anaeróbios horizontais em série (R1, R2, R3 e R4). 67

Figura 31. Valores de pH no efluente do filtro biológico percolador (FBP) e sedimentador (S). 68

Figura 32. Valores de alcalinidade parcial (AP) no efluente do filtro biológico percolador (FBP) e sedimentador (S). 68

Figura 33. Valores da relação AI/AP no efluente do filtro biológico percolador (FBP) e sedimentador (S). 69

Figura 34. Valores de ácidos voláteis totais (AVT) no efluente do filtro biológico percolador (FBP) e sedimentador (S). 69

Figura 35. Valores médios da relação sólidos voláteis e sólidos totais (SV/ST) do lodo do R1, coletados ao longo do reator (P1 e P6 a 0,50 e 5,5 m da entrada do afluente, respectivamente). 73

Figura 36. Valores médios da relação sólidos voláteis e sólidos totais (SV/ST) do lodo do R2, coletados ao longo do reator (P1 e P6 a 0,50 e 5,5 m da entrada do afluente, respectivamente). 73

Figura 37. Valores médios da relação sólidos voláteis e sólidos totais (SV/ST) do lodo do R3, coletados ao longo do reator (P1 e P6 a 0,50 e 5,5 m da entrada do afluente, respectivamente). 74

Figura 38. Valores médios da relação sólidos voláteis e sólidos totais (SV/ST) do lodo do R4, coletados ao longo do reator (P1 e P6 a 0,50 e 5,5 m da entrada do afluente, respectivamente). 74

Figura 39. Valores das eficiências de remoção de N-amoniacal no filtro biológico percolador (FBP) e sedimentador (S) e sistema anaeróbio/aeróbio (R1+R2+R3+R4+FBP+S). 79

Figura 40. Valores de nitrogênio amoniacal (N-am) no efluente do R4, filtro biológico percolador (FBP) e sedimentador (S). 82

Figura 41. Valores de nitrato ($N\text{-}NO_3^-$) e de nitrito ($N\text{-}NO_2^-$) nos efluente do filtro biológico percolador (FBP) e sedimentador (S). 82

Figura 42. Valores das eficiências de remoção de DQO total versus comprimento/diâmetro (L/D) dos reatores anaeróbios horizontais, R1, R2, R3 e R4, em série. 98

Figura 43. Valores de pH versus comprimento/diâmetro (L/D) dos reatores anaeróbios horizontais, R1, R2, R3 e R4, em série. 98

Figura 44. Valores de alcalinidade total e parcial versus comprimento/diâmetro (L/D) dos reatores anaeróbios horizontais R1, R2, R3 e R4, em série. 99

Figura 45. Valores da relação AI/AP versus comprimento/diâmetro (L/D) dos reatores anaeróbios horizontais R1, R2, R3 e R4, em série. 99

Figura 46. Valores de ácidos voláteis totais (AVT) versus comprimento/diâmetro (L/D) dos reatores anaeróbios horizontais, R1, R2, R2 e R3, em série. 100

Figura 47. Valores de nitrogênio amoniacal versus comprimento/diâmetro (L/D) dos reatores anaeróbios horizontais, R1, R2, R3 e R4. 100

Figura 48. Curva de resposta à entrada em pulso do traçador (condutividade elétrica no efluente em função do tempo), no reator anaeróbio horizontal (R1), durante o ensaio de hidrodinâmica realizado ao final do ensaio 2. 101

Figura 49. Curva de resposta à entrada em pulso do traçador (condutividade elétrica no efluente em função do tempo), no reator anaeróbio horizontal (R2), durante o ensaio de hidrodinâmica realizado ao final do ensaio 2. 101

Figura 50. Curva de resposta à entrada em pulso do traçador (condutividade elétrica no efluente em função do tempo), no reator anaeróbio horizontal (R3), durante o ensaio de hidrodinâmica realizado ao final do ensaio 2. 102

Figura 51. Curva de resposta à entrada em pulso do traçador (condutividade elétrica no efluente em função do tempo), no reator anaeróbio horizontal (R4), durante o ensaio de hidrodinâmica realizado ao final do ensaio 2. 102

Figura 52. Curvas normalizadas de distribuição do TDH obtidas experimentalmente, utilizando o NaCl como traçador, e por meio de modelos matemáticos teóricos ajustados para o reator R1. 103

Figura 53. Curvas normalizadas de distribuição do TDH obtidas experimentalmente, utilizando o NaCl como traçador, e por meio de modelos matemáticos teóricos ajustados para o reator R2. 104

Figura 54. Curvas normalizadas de distribuição do TDH obtidas experimentalmente, utilizando o NaCl como traçador, e por meio de modelos matemáticos teóricos ajustados para o reator R3. 104

Figura 55. Curvas normalizadas de distribuição do TDH obtidas experimentalmente, utilizando o NaCl como traçador, e por meio de modelos matemáticos teóricos ajustados para o reator R4. 105

TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS DE SUINOCULTURA EM REATORES ANAERÓBIOS HORIZONTAIS DE ALTA TAXA SEGUIDOS DE FILTRO BIOLÓGICO PERCOLADOR

RESUMO – A atividade suinícola se intensificou nas últimas décadas, o que proporcionou o aumento na produção de águas residuárias. Os reatores anaeróbios horizontais, em série, seguidos de filtro biológico percolador são uma nova proposta para o tratamento dessas águas residuárias, com vantagens, como a produção de biogás e o efluente final com menor poder poluente. Neste trabalho foi avaliado um sistema anaeróbio composto por um reator anaeróbio horizontal com manta de lodo (RAHML – R1), e três reatores anaeróbios horizontais com leito fixo, utilizando anéis de eletroduto corrugado (RAHLF – R2, R3 e R4) instalados em série, para o tratamento de águas residuárias de suinocultura. Também foi realizado o pós-tratamento do efluente anaeróbio em um filtro biológico percolador seguido de um sedimentador. Os tempos de detenção hidráulica (TDH) aplicados no sistema anaeróbio (R1+R2+R3+R4) foram de 65; 48,4 e 16,1 h e as cargas orgânicas volumétricas (COV) aplicadas no R1 foram similares estatisticamente, com valores médios de 16,2; 19,8 e 15,1g DQO $(L\ d)^{-1}$, nos ensaios 1, 2 e 3, respectivamente. As maiores remoções de demanda química de oxigênio total (DQOtotal), e produções volumétricas de metano de até 63% e de 0,730 m^3 CH_4 $(m^3$ reator $d)^{-1}$, ocorreram no R1, onde também foram observados os maiores tempos de retenção de sólidos (TRS), de até 49 dias. Embora os reatores R2, R3 e R4 tenham apresentado menores eficiências, contribuíram para a produção volumétrica de metano e para a estabilidade na remoção de material orgânico do sistema estudado, principalmente com a aplicação TDH maiores. Com a realização da hidrodinâmica no final do ensaio 2, utilizando o método estímulo resposta em pulso, verificou-se que os reatores anaeróbios horizontais R2, R3 e R4 possuem regime de escoamento com características de reatores de mistura completa e o R1 com características de escoamento pistonado. Com a inclusão do pós-tratamento, obteve-se remoções de até 90, 96, 64, 86, 68, 64, 77, 76 e 99,5% para a DQO total, sólidos suspensos totais (SST), nitrogênio kjedahl (NK), fósforo total (P-total), Ca, Zn, Cu, Fe, coliformes termotolerantes, respectivamente. Os resultados obtidos indicam que essa nova configuração de reatores anaeróbios e pós-tratamento de águas residuárias de suinocultura são promissores e devem ser investigados.

Palavras-chave: arquéias metanogênicas, dejetos de suínos, digestão anaeróbia, hidrodinâmica dos reatores horizontais, produção metano, remoção de DQO.

SWINE WASTEWATER TREATMENT IN HIGH-RATE HORIZONTAL ANAEROBIC REACTORS FOLLOWED FOR TRICKLING FILTER

ABSTRACT - The swine activity has intensified in the last decades which resulted in the increased production of wastewater. The horizontal anaerobic reactors in series, followed by biological trickling filter are a new proposal in the treatment of these wastewaters and presents advantages such as biogas production and the final effluent with power pollutant reduced. This study evaluated an anaerobic system formed by a horizontal anaerobic sludge blanket (RAHML - R1), and three horizontal anaerobic reactors with fixed bed utilizing as material support rings of corrugated conduit (RAHLF - R2, R3 and R4) installed in series, for the treatment of wastewater swine. Was also performed post-treatment of anaerobic effluent in a biological trickling filter followed by a settler. The hydraulic retention time (HRT) applied in the anaerobic system (R1 + R2 + R3 + R4) were 65; 48.4 and 16.1 h and the organic loading rate (OLR) applied in R1 were statistically similar, with mean values of 16.2; 19.8 and 15.1 g COD (L d) $^{-1}$, in trials 1, 2 and 3, respectively. The highest removals of total chemical oxygen demand (totalCOD), and volumetric methane productions of up to 63% and 0.730 m^3 CH_4 (m^3 reactor d)$^{-1}$, and occurred in R1, which were also observed the largest solid retention times (SRT) of up to 49 days. Although the R2 reactors, R3 and R4 presented lower efficiencies, but they contributed to the volumetric production of methane and to stability in the removal of organic matter in the studied system, especially with the largest application HDT. With the realization of the hydrodynamic at end of test 2 for answers stimulation pulse method, was possible to observe that the horizontal anaerobic reactors R2, R3 and R4 are flow regime with complete mixing reactor characteristics and R1 with plug flow characteristics. With the inclusion of post-treatment system, there were removals up to 90, 96, 64, 86, 68, 64, 77, 76 and 99.5% for total COD, total suspended solids (SST), Kjeldahl nitrogen (NK), total phosphorus (P-total), Ca, Zn, Cu, Fe, fecal coliforms, respectively. The results indicate that this new configuration of anaerobic reactors and post-treatment of swine wastewater are promising and should be investigated.

Keywords: methanogenic archaea, swine waste, anaerobic digestion, hydrodynamics of horizontal reactors, methane production, COD removal.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de desenvolvimento sustentável e a perspectiva de exaustão dos combustíveis fósseis contribuíram para o aumento mundial da oferta de energia e combustíveis renováveis (TABATABAEI et al., 2010). A produção de resíduos orgânicos, como as água residuárias de suinocultura, pode representar uma matéria-prima importante para a produção de energia renovável e subprodutos (LEITÃO et al., 2006).

A carne suína representou 37% de toda carne consumida no mundo em 2012 (McGLONE, 2013). De acordo com Eurostat (2013) a Alemanha, Dinamarca, Espanha e França possuíam 140 milhões de cabeças de suínos, o que corresponde a 54,4% da produção de suínos na União Europeia, e que produziram 250×10^6 m^3 de dejetos por ano. O Brasil ocupa o 4º lugar no ranking mundial, com aproximadamente 39 milhões de cabeças de suínos (ABPA, 2014). A produção de suínos aumentou nas últimas décadas, em virtude do crescimento intensivo da demanda por proteína animal.

A produção intensiva de suínos resultou na geração de grandes volumes de águas residuárias, que podem gerar impacto sobre o meio ambiente (HUANG et al., 2014). As águas residuárias de suinocultura são caracterizadas pelo elevado teor de matéria orgânica, sais inorgânicos, metais pesados (Cu e Zn) e agentes patogênicos (VILAJELIU-PONS et al., 2015), e também contribuem para a geração de gases como o NH_3, CO_2, H_2S e SO_2 (DAI et al., 2015) e, consequentemente, a poluição do meio ambiente. Nas águas residuárias de suinocultura também são encontradas altas concentrações de nitrogênio e fósforo, em virtude do baixo aproveitamento desses nutrientes pelos animais, ocasionando sérios problemas ambientais se disposto incorretamente (NIELSEN et al., 2009).

A digestão anaeróbia emergiu como um novo modelo de valorização da biomassa, atraindo investimentos por questões atuais, como o aquecimento global, a demanda por energia renovável, a diminuição da poluição do meio ambiente e a legislação associada ao tratamento de resíduos orgânicos (TIWARY et al., 2015). Portanto, a digestão anaeróbia é uma alternativa atraente para o tratamento de águas residuárias de suinocultura, principalmente em virtude da produção de

metano que pode ser utilizado como uma fonte de energia (YANG et al., 2015) e de efluente final com poder poluente reduzido.

Os reatores anaeróbios de alta taxa destacam-se, em virtude da alta capacidade de carga, biomassa concentrada, resistência a sobrecargas hidráulicas ou orgânicas (KARADAG et al., 2015). Diversas configurações de reatores anaeróbios de alta taxa estão sendo estudadas para o tratamento de águas residuárias de suinocultura, destacando-se os reatores anaeróbios horizontais, em virtude da facilidade de instalação, manutenção e operação, e menor complexidade estrutural (SANTOS e OLIVEIRA, 2011; SAVAN et al., 2012; DUDA et al., 2015).

O reator anaeróbio horizontal de alta taxa com manta de lodo (RAHML) e de leito fixo (RAHLF) se diferenciam por apresentarem fluxo em pistão, o que permite o desenvolvimento de populações microbianas distintas ao longo do comprimento do reator (CUEL, et al., 2011). Assim, os compostos intermediários resultantes da hidrólise podem ser degradados nas regiões posteriores ao longo do comprimento do reator (DAMIANOVIC et al., 2009). O meio suporte presente nos RAHLF tem como finalidade imobilizar os micro-organismos, em particular os metanogênicos, para melhorar a robustez do processo (ADU-GYAMFI; RAVELLA e HOBBS, 2012) e evitar o arraste de lodo.

Os reatores anaeróbios horizontais de alta taxa em série, também são uma alternativa interessante para atenuar as variações quantitativas e qualitativas das águas residuárias de suinocultura ocasionado pelo manejo dos animais e dos dejetos nas propriedades rurais. Entre as vantagens da utilização dos reatores anaeróbios em série, para o tratamento de águas residuárias de suinocultura, descritas por Urbinati e Oliveira (2014), destacam-se o aumento da remoção de sólidos suspensos, demanda química de oxigênio (DQO), metais e coliformes; redução do tempo de detenção hidráulico (TDH) e o aumento da estabilidade do sistema.

Embora os reatores anaeróbios sejam eficientes na remoção de matéria orgânica e contribuírem, na remoção de nutrientes e patógenos, o efluente produzido ainda precisa de um pós-tratamento para complementar as remoções e atingir padrões de qualidade para lançamento de efluentes.

Existem diversas configurações de reatores aeróbios que podem ser

utilizados no pós-tratamento, como o filtro biológico percolador, as lagoas de polimento, biofiltro aerado submerso, lodos ativados, wetlands e reatores em bateladas sequenciais (RBS). Dentre essas alternativas destaca-se o filtro biológico percolador, pela simplicidade, baixo consumo de energia e custo operacional, além de permitir remoções de matéria orgânica, de nutrientes como nitrogênio pela nitrificação e de patógenos no efluente final.

7. REFERÊNCIAS

ADU-GYAMF, N.; RAVELLA, S. R.; HOBBS, P. J. Optimizing anaerobic digestion by selection of the immobilizing surface for enhanced methane production. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 120, p. 248–255, 2012.

ABICS (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS CRIADORES DE SUÍNOS) (Ed.). **Manual Brasileiro de boas práticas agropecuárias na produção de suínos**. Brasília, DF: ABCS, MAPA; Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2011. 140 p. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB0QFjAAahUKEwiu7Z787vvIAhWFkJAKHdxpDlk&url=http%3A%2F%2Fwww.acrismat.com.br%2Fnovo_site%2Farquivos%2F27012012124348manual_brasileiro.pdf&usg=AFQjCNFNqZZ-KyVY3R2DUcwr7G_fFRve4Q&sig2=bXfatn-wUdn6JjJbV7GCPQ&cad=rja >. Acesso em: 06 nov. 2015.

AKKER, B. V.D.; HOLMES, M.; PEARCE, P.; CROMAR, N. J.; FALLOWFIELD, H. J. Structure of nitrifying biofilms in a high-rate trickling filter designed for potable water pre-treatment. **Water Research,** London, v. 45, n.11, p. 3489 – 3498, 2011.

ALMEIDA, P.G.S.; OLIVEIRA, S.C.; CHERNICHARO, C.A.L. Operação de filtros biológicos percoladores pós-reatores UASB sem a etapa de decantação secundária. **Engenharia Sanitária e Ambiental,** Rio de Janeiro, v.16, n.3, p. 271-280, 2011.

AMARAL, A. C.; KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; JUSTI, K. C. Zinc and copper distribution in swine wastewater treated by anaerobic digestion. **Journal of Environmental Management**, London, v. 141, p. 132–137, mar. 2014.

APHA; AWWA; WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21th ed. Washington, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA PRODUTORA E EXPORTADORA DE CARNE SUÍNA (ABIPECS). **Produção mundial de carne suína**. São Paulo: ABPA, [2014?]. Disponível em: <http://www.abipecs.org.br/pt/estatisticas/mundial/producao-2.html>. Acesso em: 07 jul. 2014.

BARRET, M.; GAGNON, N.; TOPP, E.; MASSE, L.; MASSÉ, D. I.; TALBOT, G. Physico-chemical characteristics and methanogen communities in swine and dairy manure storage tanks: Spatio-temporal variations and impact on methanogenic activity. **Water Research**, London, v. 47, n. 2, p. 737–746, 2013.

BRASIL. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Retificada em 09 de maio de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de águas e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Disponível em:<http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=consultarLegislacaoFederal>. Acesso em: 05 nov. 2015.

BRASIL. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 30 ago. 2006. Seção 1. Disponível em: <http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=consultarLegislacaoFederal>. Acesso em: 05 nov. 2015.

BRASIL. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Complementa a Resolução nº 357/2005. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 16 maio 2011. p. 89. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso em: 05 nov. 2015.

BRUNO, N. M. N.; OLIVEIRA, R. A.; Start-up of horizontal anaerobic reactors with sludge blanket and fixed bed for wastewater treatment from coffee processing by wet method. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 2, p. 353-366, mar./abr. 2013.

CAMARGO, S. A. R. de. **Filtro anaeróbio com enchimento em bambu para o tratamento de esgotos sanitários: avaliação da partida e operação**. 194 p. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, área de concentração de Saneamento e Ambiente). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

CANGANI, M. T. **Tratamento anaeróbio-aeróbio de águas residuárias de suinocultura e reúso na produção de milho para silagem**. 2011. 253 f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agropecuária) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2011.

CARVALHO, K. Q.; SALGADO, M. T.; PASSIG, F. H; PIRES, E. C. Avaliação hidrodinâmica de reator UASB submetido à variação cíclica de vazão. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 226-235, 2008.

CASTRO, F. M. S. **Determinação de variáveis hidrodinâmicas em reator UASB com nova proposta de configuração do separador de fases**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA/UFMG), 2007. v. 5, 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias).

CHINALIA, F. A.; GARBOSSA, L. H. P.; RODRIGUEZ, J. A.; LAPA, K. R.; FORESTI, E. A two-stage aerobic/anaerobic denitrifying horizontal bioreactor designed for

treating ammonium and h2s simultaneously. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, Totowa, v. 168, n. 6, p. 1643-1654, 2012.

CLIFFORD, E.; NIELSEN, M.; SORENSEN, K.; RODGERS, M. Nitrogen dynamics and removal in a horizontal flow biofilm reactor for wastewater treatment. **Water Research**, London, v. 44, n. 13, p. 3819-3828, 2010.

COLIN, X.; FARINET, J.-L.; ROJAS, O.; ALAZARD, D. Anaerobic treatment of cassava starch extraction wastewater using a horizontal flow filter with bamboo as support. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 98, n. 8, p. 1602-1607, 2007.

CUEL, M. F.; KWONG, W. H.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. Solution of a heterogeneous modeling of a horizontal-flow anaerobic immobilized biomass (HAIB) reactor by the sequencing method. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Ottawa, v. 38, n. 4, p. 415–421, 2011.

DAÍ, X. R.; SAHA, C. K.; NI, J. Q.; HEBER, A. J.; BLANES-VIDAL, V.; DUNN, J. L. Characteristics of pollutant gas releases from swine, dairy, beef, and layer manure, and municipal wastewater. **Water Research**, London, v. 76, p. 110-119, jun. 2015.

DAMIANOVIC, M. H. R. Z. MORAES, E. M.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. Pentachlorophenol (PCP) dechlorination in horizontal-flow anaerobic immobilized biomass (HAIB) reactors. **Bioresource technology**, Amsterdam, v. 100, n. 19, p. 4361-4367, 2009.

DAMIANOVIC, M. H. R. Z.; FORESTI, E. Dynamics of sulfidogenesis associated to methanogenesis in horizontal-flow anaerobic immobilized biomass reactor. **Process Biochemistry**, London, v. 44, p. 1050-1054, 2009.

DANTAS, A. R.; MELO, H. N. S. de; NETO, C. O. A. de. Aplicação de traçadores em filtros anaeróbios para avaliação das características hidrodinâmicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27, 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** ABES,. p. 1-12, 1999.

DARTORA, V.; PERDOMO, C. C.; TUMELERO, I. L. Manejo de dejetos de suínos. **Boletim informativo BIPERS**, Concórdia, v. 7, n. 11, p. 5-33, mar. 1998.

DE NARDI, I. R. **Influência das características do traçador nas curvas de distribuição de tempos de residência em reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF).** São Carlos, 1997. 91p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

DENG, L. W.; ZHENG, P.; CHEN, Z. A.; MAHMOOD, Q. Improvement in post-treatment of digested swine wastewater. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v.99, n.8, p.3136-3145, 2008.

DENG, L.; YANG, H.; LIU, G.; ZHENG, D.; CHEN, Z.; LIU, Y.; PU, X.; SONG, L.; WANG, Z.; LEI, Y. Kinetics of temperature effects and its significance to the heating strategy for anaerobic digestion of swine wastewater. **Applied Energy**, Kidlington, v. 134, p. 349–355, 2014.

DIAS, A. C. et al. **Manual Brasileiro de Boas Práticas Agropecuárias na Produção de Suínos**. Brasília, DF:ABCS; MAPA; Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2011.

DILALLO, R.; ALBERTSON, O. E. Volatile acids by direct titration. **Journal of Water Pollution Control Federation**, Alexandria, v. 33, p. 356-365, 1961.

DUDA, R. M. **Desempenho de sistema composto por reatores anaeróbios em série seguido de filtro biológico percolador no tratamento de águas residuárias de suinocultura**. 2010. 241 f. Tese (Doutorado em Microbiologia Agropecuária) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2010.

DUDA, R. M. OLIVEIRA, R. A. Tratamento de águas residuárias de suinocultura em reator UASB e filtro anaeróbio em série seguidos de filtro biológico percolador. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de janeiro, v. 16, n. 1, p. 91-100, 2011.

DUDA, R. M.; VANTINI, J. S.; MARTINS, L. S.; VARANI, A. M.; LEMOS, M. V. F.; TIRABOSCHI, M. I.; OLIVEIRA, R. A. A balanced microbiota efficiently produces methane in a novel high-rate horizontal anaerobic reactor for the treatment of swine wastewater. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 197, p. 152-160, 2015.

ESCUDIÉ, R.; CRESSON, R.; DELGENE`S, J. P.; BERNET, N. Control of start-up and operation of anaerobic biofilm reactors: An overview of 15 years of research. **Water Research**, London, v. 45, n. 1, p. 1-10, 2011.

EUROSTAT: Estatistics Explained .**Estatísticas da suinocultura**. Luxemburgo, 2013. Disponível em: < http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Main_Page >. Acesso em: 10/jun. 2015.

FENG, Q.; WANG, Y.; WANG, T.; ZHENG, H.; CHU, L.; ZHANG, C.; CHEN, H.; KONG, X.; XING, X. Effects of packing rates of cubic-shaped polyurethane foam carriers on the microbial community and the removal of organics and nitrogen in moving bed biofilm reactors. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 117, p. 201-207, 2012.

FERNANDES, G. F. R.; OLIVEIRA, R. A. de. Desempenho de processo anaeróbio em dois estágios (reator compartimentado seguido de reator UASB) para tratamento de águas residuárias de suinocultura. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 243-256, 2006.

FERREIRA, E. S. Cinética química e fundamentos dos processos de nitrificação e denitrificação biológica. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA

SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27., 2000, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: AIDIS, 2000.

FORESTI, E. Fundamentos do processo de digestão anaeróbia. In: SEMINARIO LATIONOAMERICANO, Montivideo. **Memorias...** Montivideo: ICA, v. 3, p.96-109, 1994.

FRANKE-WHITTLE, I. H.; WALTER, A.; EBNER, C.; INSAM, H. Investigation into the effect of high concentrations of volatile fatty acids in anaerobic digestion on methanogenic communities. **Waste Management**, Kidlington, v. 34, p. 2080-2089, 2014.

GONÇALVES, R. F. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por reatores com biofilme. In: GONÇALVES, R. F. **Pós - tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: PROSAB, p. 171-271, 2001.

GUSMÃO, V. R.; MARTINS, T. H.; CHINALIA, F. A.; SAKAMOTO, I. K.; THIEMANN, O. H.; VARESCHE, M. B. A. BTEX and ethanol removal in horizontal-flow anaerobic immobilized biomass reactor, under denitrifying condition. **Process Biochemistry**, London, v. 41, p. 1391-1400, 2006.

HORI, T.; HARUTA, S.; UENO, Y.; ISHII, M.; IGARASHI, Y. Dynamic transition of a methanogenic population in response to the concentration of volatile fatty acids in a thermophilic anaerobic digester, **Applied Environmental Microbiology**, Washington, v. 72, p. 1623-1630, 2006.

HUANG, H.; CHEN, Y.; JIANG, Y.; DING, L. Treatment of swine wastewater combined with MgO-saponification wastewater by struvite precipitation technology. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 254, p. 418–425, 2014.

HUTCHISON, M. L.; WALTERS, L. D.; AVERY, S. M.; MUNRO, F.; MOORE, A. Analyses of livestock production, waste storage, and pathogen levels and prevalence in farm manures. **Applied Environmental Microbiology**, Washington, v. 71, p. 1231–1236, 2005.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: ABESRJ, 1995. 682 p.

KARADAG, D.; KÖROĞLU, O. E.; OZKAYA, B.; CAKMAKCI, M. A review on anaerobic biofilm reactors for the treatment of dairy industry wastewater. **Process Biochemistry**, London, v. 50, p. 262–271, febr. 2015.

KIM, W.; SHIN, S. G.; CHO, K.; LEE, C.; HWANG, S. Performance of methanogenic reactors in temperature phased two-stage anaerobic digestion of swine wastewater. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, Osaka, v. 114, p. 635–639, dec. 2012.

KIM, W.; CHO, K.; LEE, S.; HWANG, S. Comparison of methanogenic community structure and anaerobic process performance treating swine wastewater between

pilot and optimized lab scale bioreactors. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 145, p. 48–56, 2013.

KINYUA, M. N.; CUNNINGHAM, J.; ERGAS, S. J. Effect of solids retention time on the bioavailability of organic carbon in anaerobically digested swine waste. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 162, p. 14-20, june, 2014.

KUCZMAN, O.; TORRES, D. G. B.; GOMES, S. D.; TAVARES, M. H. F.; ALCANTARA, M. S. Tratamento anaeróbio de efluente de fecularia em reator horizontal de uma fase. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36., 2007, Bonito. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2007. 1 CD-ROM.

LEITÃO, R. C.; HANDEL, A. C.; ZEEMAN, G.; LETTINGA, G. The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: a rewiew. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 97, n. 9, p. 1105-1118, 2006.

LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas**. Cálculo de reatores. São Paulo- SP, Ed. Edgard Blucher, v.2, 1974.

LIN, L.; WAN, C.; LIU, X.; LEE, D. J.; LEI, Z.; ZHANG, Y.; TAY, J. H. Efeito do pH inicial na hidrólise mesófilos e acidificação dos dejetos de suínos. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 136, p. 302-308, maio, 2013.

LIU, Y. H.; KUMAR, S.; KWAG, J. H.; KIM, J. H.; KIM, J. D.; RA, C. S. Recycle of electrolytically dissolved struvite as an alternative to enhance phosphate and nitrogen recovery from swine wastewater. **Journal Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 195, p. 175-181, 2011.

MAO, C.; FENG, Y.; WANG, X.; REN, G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kidlington, v. 45, p. 540–555, may 2015.

MARTENS, W.; BOHM, R. Overview of the ability of different treatment methods for liquid and solid manure to inactivate pathogens. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 100, p. 5374–5378, 2009.

MASCARENHAS, L. C. A.; VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, A. L. Avaliação do desempenho de lagoas de polimento rasa, em série, para o pós-tratamento de efluentes de reator UASB. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, p. 45-54, 2004.

MATANGUE, M. T. A. **Comportamento hidrodinâmico e cinético dos reatores anaeróbios compartimentados (RAC) e manta de lodo (UASB) operados em série**. 2011. 395 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

McGLONE, J. J. The future of pork production in the world: Towards sustainable, welfare-positive systems. **Animals**, Cambridge, v. 3, p. 401–415, 2013.

MEDEIROS, M. **Pós tratamento de lagoa facultativa fotossintética em filtros biológicos percoladores visando remoção de nitrogênio amoniacal**. 2011. 132 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

METCALF & EDDY. Inc. **Wastewater Engineering treatment disposal and reuse**. 4. ed., New York, McGraw - Hill Book, 1815p. 2003.

MORTON, A. E.; AUVERNAM, B. Comparison of Plastic Trickling Filter Media for the Treatment of Swine Lagoon Effluent. In: ASAE Annual International Meeting, Sacramento – Califórnia, **Proceedings...** Sacramento: ASAE, p. 1-10, 2001.

NAGASAKI, K.; KWON, S. H.; TAKEMOTO, Y. An interesting correlation between methane production rates and archaea cell density during anaerobic digestion with increasing organic loading. **Biomass and Bioenergy**, Kidlington, v. 78, p. 17–24. 2015.

NARDI, I. R.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. Influence of the tracer characteristics on hydrodynamic models of packed-bed bioreactors. **Bioprocess Engineering**, Secaucus, v. 21, p. 469-76, nov. 2005.

NASCIMENTO, M. C. P. **Filtro biológico percolador de pequena altura de meio suporte aplicado ao pós-tratamento de efluente de reator UASB.** Dissertação(Mestrado) 168 f. - Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos. 2001.

NDON, U. J.; DAGUE, R. R. Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic sequencing batch reactor treatment of low-strength wastewater. **Water Research,** Oxford, v. 31, n. 10, p. 2455-2466, 1997.

NIELSEN-HOLM, J. B.; AL SEADI, T.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 100, p. 5478–5484, 2009.

NRC (NATIONAL RESEARCH COUNCIL). **Nutrient requirements of swine**. 10th rev. ed., Canadá,1998.

OLIVEIRA, P. A. V. **Manual de manejo e utilização de dejetos de suínos**. Embrapa Suínos e Aves, Concórdia - SC. Documentos, 27, p. 188, 1993.

OLIVEIRA, R. A.; **Efeito da concentração de sólidos suspensos do afluente nodesempenho e características do lodo de reatores anaeróbios de fluxo**

ascendente com manta de lodo tratando águas residuárias de suinocultura. 1997. 359 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

OLIVEIRA, R. A., FORESTI, E. Balanço de massa de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) tratando águas residuárias de suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 807-820, 2004.

OLIVEIRA, L. L.; COSTA, R. B.; OKADA, D. Y.; VICH, D. V.; DUARTE, I. C. S.; SILVA, E. L.; VARESCHE, M. B. A. Anaerobic degradation of linear alkylbenzene sulfonate (LAS) in fluidized bed reactor by microbial consortia in different support materials. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 101, p. 5112-5122, 2010.

OLIVEIRA, R. A. de; SANTANA, A. M. Tratamento de águas residuárias de suinocultura em reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo em dois estágios seguidos de reator operado em batelada sequencial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal,v.31, n.1, p.178-192, 2011.

OLIVEIRA, R. A.; DUDA, R. M.; FERNANDES, G. F. R. Reator anaeróbio compartimentado para o tratamento de águas residuárias de suinocultura. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.19, n.4,P. 383-391, 2014.

PARK, W.; JANG, E.; LEE, M. YU, S.; KIM, T. Combination of ion exchange system and biological reactors for simultaneous removal of ammonia and organics. **Journal Environmental Management**, London, v. 92, p. 1148–1153, 2011.

PERDOMO, C. C; COSTA, R. R; MEDRI, V; MIRANDA, C. R. Dimensionamento de sistema de tratamento e utilização de dejetos suínos. Concórdia: EMBRPA. Suínos e Aves, p.5, 1999. (EMBRAPA - Suínos e Aves. Comunicado Técnico, 234).

PEREIRA, E. L.; CAMPOS, C. M. M.; MOTERANI, F.; Avaliação do desempenho físico-químico de um reator UASB construído em escala piloto na remoção de poluentes de efluentes de suinocultura. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 5, n. 1, p. 79-88, 2010.

PERVIN, H. M.; BATSTONE, D. J.; BOND, P. L. Previously unclassified bacteria dominate during thermophilic and mesophilic anaerobic pre-treatment of primary sludge. **Systematic and Applied Microbiology**, Muenchen, v. 36, p. 281–290, 2013.

RIBEIRO, A. M. L.; PINHEIRO, C. C.; GIANFELICE, M. Nutrientes que afetam a imunidade dos leitões. **Acta Scientiae Veterinaria**, Porto Alegre, v. 36, p. 119-124, 2008.

RIBEIRO, R.; NARDI, I. R.; FERNANDES, B. S.; FORESTI, E.; ZAIAT, M. BTEX removal in a horizontal-flow anaerobic immobilized biomass reactor under denitrifying conditions. **Biodegradation**, Dordrecht, v. 24, n. 24, p. 269-278, 2012.

RIPLEY, L. E.; BOYLE, W. C.; CONVERSE, J. C. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. **Journal Water Pollution Control Federation**, Alexandria, v. 58, n. 5, p. 406-411, 1986.

SANTOS, A. C. **Tratamento de águas residuárias de suinocultura em reatores anaeróbios horizontais seguidos de reator operado em bateladas sequenciais**. 2009. 134 f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agropecuária) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2009.

SANTOS, A. C.; OLIVEIRA, R. A. Tratamento de águas residuárias de suinocultura em reatores anaeróbios horizontais seguidos de reator aeróbio em batelada sequencial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 4, p. 781-794, jul./ago. 2011.

SAVAN, J. C.; DUDA, R. M.; OLIVEIRA, R. A. Tratamento de águas residuárias de suinocultura em reatores anaeróbios horizontais seguidos de reator aeróbio operado em bateladas sequenciais. **Ciência & Tecnologia: Fatec-JB**, Jaboticabal, v. 4, 2012.

SEGANFREDO, M. A. **Gestão ambiental na suinocultura**. Brasilia, DF: Embrapa Informação Tecnologica, 2007. 302 p.

SCHRAMM, A.; SANTEGOEDS, C. M.; NIELSEN, H. K.; PLOUG, H.; WAGNER, M.; PRIBYL, M.; WANNER, J.; AMANN, R.; BEER, D. D. On the occurrence of anoxic microniches, denitri- fi cation, and sulfate reduction in aerated activated sludge. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington v.65, p. 4189-4196, 1999.

SHIN, S. G.; YOO, S.; HWANG, K.; SONG, M.; KIM, W.; HAN, G.; HWANG, S. Dynamics of transitional acidogenic community along with methanogenic population during anaerobic digestion of swine wastewater. **Process Biochemistry**, London, v. 46, p. 1607-1613, 2011.

SILVA, G. C. **Tratamento de águas residuárias de suinocultura em reatores anaeróbios seguidos de filtro biológico percolador e wetland**. 2012. 314 f. Tese (Doutorado em Microbiologia Agropecuária) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2013.

SONG, M.; SHIN, S. G.;HWANG, S. Methanogenic population dynamics assessed by real-time quantitative PCR in sludge granule in upflow anaerobic sludge blanket treating swine wastewater. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 101, p. 23-28, 2010.

SWAINE, D. E.; DAUGULIS, A. J. Rewiw of liquid mixing in packed bed biological reactors. **Biotecnology Process**, United Kingdom, v.4, n.3, p. 134 a 148, 1988.

SZWERINSKI, H.; ARVIN, E.; HARREMOES, P. pH-decrease in nitrifying biofilms. **Water research**, London, v. 20, n. 8, p. 971-976, 1986.

TABATABAEI, M.; RAHIM, R. A.; ABDULLAH, N.; WRIGHT, A. D. G.; SHIRAI, Y.; SAKAI, K.; SULAIMAN, A.; HASSAN, M. A. Importance of the methanogenic archaea populations in anaerobic wastewater treatments. **Process Biochemistry**, London, v. 45, p. 1214–1225, aug. 2010.

TIWARY, A.; WILLIAMS, I. D.; PANT, D. C.; KISHORE, V. V. N. Emerging perspectives on environmental burden minimisation initiatives from anaerobic digestion technologies for community scale biomass valorization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kidlington, v. 42, p. 883–901, 2015.

TUESORN, S.; WONGWILAIWALIN, S.; CHAMPREDA, V.; LEETHOCHAWALIT, M.; NOPHARATANA, A.; TECHKARNJANARUK, S.; CHAIPRASERT, P. Enhancement of biogas production from swine manure by a lignocellulolytic microbial consortium. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 144, p. 579-586, September, 2013.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Departamento de Ciências Exatas. **Estação Agroclimatológica**: valores médios do período de 2014 -2015. Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinpárias - UNESP. Disponível em <www.fcav.unesp.br/estacao>. Acesso em: 05 agosto de 2015.

URBINATI, E. T**ratamento de águas residuárias de suinocultura em reatores UASB e em batelada com fase aeróbia, em série, e reúso na produção de milho e sorgo.** 2011. 290 f. Tese (Doutorado em Microbiologia Agropecuária) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2011.

URBINATI, E.; OLIVEIRA, R. A. Anaerobic-aerobic treatment of swine wastewater in UASB and batch reactors in series. **Engenharia Agrícola,** Jaboticabal, v. 34, n. 1, p. 124-142, feb. 2014.

VIANCELLI, A.; KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; KICH, J. D.; SOUZA, C. K.; CANAL, C. W.; COLDEBELLA, A.; ESTEVES, P. A.; BARARDI, C. R. M. Performance of two swine manure treatment systems on chemical composition and on the reduction of pathogens. **Chemosphere**, Kidlington, v. 90, p. 1539–1544, jan. 2013.

VICTORIA, J. A. R. **Filtro biológico aeróbio-anóxico para remoção de nitrogênio de efluentes de reatores UASB**. 2006. 146 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

VILAJELIU-PONS, A.; PUIG, S.; POUS, N.; SALCEDO-DÁVILA, I.; BAÑERAS, L.; BALAGUER, M. D.; COLPRIM, J. Microbiome characterization of MFCs used for the treatment of swine manure. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 288, p. 60–68, 2015.

WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION). **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater**: policy and regulatory aspects. Genebra, v. 1, p.100, 2006

XAVIER, J.B.; PICIOREANU, C; VAN LOOSDRECHT, M.C.M. Assessment of three-dimensional biofilm models through direct comparison with confocal microscopy imaging. **Water Science and Technology**, London, v. 49, n.11–12, p. 177–185, 2004.

XAVIER, J. B.; PICIOREANU,C.; ALMEIDA, J. S.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M. **Monitorização e modelação da estrutura de biofilmes**. Boletim de Biotecnologia. Biomatemática - Modelação da estrutura de Biofilmes. 2002.

YANG, D.; DENG, L.; ZHENG, D.; LIU, G.; YANG, H.; WANG, L. Separation of swine wastewater into solid fraction, concentrated slurry and dilute liquid and its influence on biogas production. **Fuel**, Oxford, v. 144, p. 237–243, 2015.

ZAIAT, M. **Desenvolvimento de reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF) para tratamento de águas residuárias**. 1996. 157 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

ZAIAT, M.; VIEIRA, L G T.; FORESTI, E. Spatial and temporal variations of monitoring performance parameters in Horizontal-Flow Anaerobic Immobilized Sludge (HAIS) reactor treating synthetic substrate. **Water Research**, Oxford, v. 31, n. 7, p. 1760-1766, 1997.

ZAIAT, M. **Desenvolvimento e análise de biorreatores anaeróbios contendo células imobilizadas para tratamento de águas residuárias**: reator anaeróbio horizontal de leito fixo e reator anaeróbio operado em bateladas sequenciais. 2003. 122 f. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ZHANG, Z., ZHU, J., KING, J., LI, W. A two-step fed SBR for treating swine manure. **Process Biochemistry,** London, v.41, n.4, p.892-900, 2006.