



Estudo comparativo entre lagoas de alta taxa de produção de algas e de macrófitas no tratamento secundário de esgoto sanitário

Eddie F. Gómez¹, José Carlos Alves Barroso Júnior¹, Eduarda Hoppen Mallman¹, Nestor L. Muñoz¹, Luiz O. Monteggia¹

¹Instituto de Pesquisas Hidráulicas/Universidade Federal do Rio Grande do Sul
(gomez.69@osu.edu)

Resumo

As vantagens das estações de tratamento de esgoto nem sempre atingem as populações mais vulneráveis devido, entre outros fatores, aos altos custos de instalação e operação e à falta de redes coletoras de esgoto, que ainda são grandes desafios tanto nas zonas rurais como nas principais cidades do Brasil. O presente estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar o desempenho de lagoas de alta taxa (LAT) de produção de macrófitas (LAT_M) e de algas (LAT_A) no tratamento do efluente de um reator UASB alimentado com esgoto bruto (EB) doméstico. A LAT_M obteve remoções médias de NTK e fósforo total (Pt) de 46,9±6,6 e 45,5±6,2 %, respectivamente. A LAT_A obteve remoções de NTK e Pt de 45,8±14 e 37,8±5,1 %, respectivamente. Além disso, foi constatado que não houve diferenças significativas na remoção de nutrientes entre as lagoas após a operação com macrófitas. Neste estudo foi também demonstrado o potencial de produção de biomassa utilizando processos simples de tratamento de águas residuárias. As macrófitas produzidas nas LAT_M, as quais podem ser facilmente colhidas do meio de cultura utilizando processos de separação simples, têm o potencial de produzir: 15.915,4 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (15,9 t) de proteína para alimentação animal e de 11.724,8 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (11,7 t) de carboidratos altamente biodegradáveis que podem ser transformados em combustíveis renováveis. Por outro lado, os nutrientes recuperados pelas macrófitas podem ser aproveitados para produção de adubos orgânicos, os quais favorecem à sustentabilidade dos sistemas de produção agrícolas.

Palavras-chave: Esgoto. Nutrientes. Lagoas de alta taxa. Biomassa. UASB.

Área Temática: Tema 1 – Águas Residuárias.

Comparative study between algal and duckweed-based high-rate ponds for secondary treatment of municipal wastewaters

Abstract

The advantages of sewage treatment plants do not always reach the most vulnerable populations, among other factors, due to the high costs of installation and operation and the lack of collection systems; all of which, major challenges in both rural areas and in the main cities of Brazil. This study was conducted to evaluate the performance of high-rate ponds for duckweed (LAT_M) and algae (LAT_A) production for the treatment of the effluent of a UASB anaerobic reactor receiving raw domestic sewage (EB). The average removal of NTK and total phosphorus (Pt) in the LAT_M was of 46.9±6.6 and 45.5±6.2%, respectively. In the algal-based pond the average removal of NTK and PT was of 45.8±14 and 37.8±5.1, respectively. Furthermore, differences in nutrient removals between both ponds after the operation with



duckweed were not significant. This study also demonstrated the potential of biomass production using simple processes of wastewater treatment. Duckweed produced in HRP, which can also be easily harvested using simple separation processes, has the potential to produce: 15,915.4 kg ha⁻¹ y⁻¹ (15.9 t) of protein that can be used for the production of animal feed and of 11,724.8 kg ha⁻¹ y⁻¹ (11.7 t) of highly biodegradable carbohydrates that can be easily converted into renewable fuels. On the other hand, nutrients recovered in the duckweed biomass, can be recovered into organic fertilizers in order to improve the sustainability of agricultural production systems.

Keywords: Wastewater. Nutrients. High-rate ponds. Biomass. UASB.

Theme Area: Theme 1 – Wastewaters.

1 Introdução

Para tratar efluentes domésticos e industriais, estações de tratamento de esgoto (ETEs) utilizam diferentes processos (físicos, químicos e biológicos) com o objetivo de remover materiais grosseiros, substâncias indesejáveis e eliminar microrganismos patogênicos. No entanto, as vantagens das ETEs nem sempre atingem as populações mais vulneráveis devido, entre outros fatores, aos altos custos de instalação e operação e à falta de redes coletoras de esgoto, que ainda são grandes desafios tanto nas zonas rurais como nas principais cidades do Brasil (SNSA/MCIDADES, 2014). Desta forma, existe grande interesse no desenvolvimento de ETEs mais simples e eficientes e que, ao mesmo tempo, gerem produtos de valor agregado, tais como energia e adubos orgânicos, reduzindo assim os custos associados ao tratamento de esgoto para a sociedade (DEMIRBAS e DEMIRBAS, 2007).

Entre os métodos mais eficientes e de baixo custo utilizados para o tratamento de esgoto em países tropicais, destacam-se os processos de digestão anaeróbia (NIJAGUNA, 2006). A digestão anaeróbia (DA) oferece também a vantagem de transformar parte da matéria orgânica contida no esgoto em biogás, uma fonte de energia renovável. Contudo, os efluentes de sistemas anaeróbios requerem tratamentos adicionais para atingir os padrões de emissão de poluentes, principalmente de nutrientes e de microrganismos patogênicos (CAVALCANTI *et al.*, 2001). Entre as alternativas mais simples para efetuar o pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, destaca-se o uso de lagoas de polimento. Estudos realizados por Cavalcanti (2003), em reatores anaeróbios seguidos de lagoas de polimento, demonstraram reduções significativas nas concentrações de fósforo e nitrogênio, assim como dos principais indicadores de microrganismos patogênicos.

Embora a utilização de lagoas de polimento seja uma das alternativas mais simples para o pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, a presença de algas no efluente da lagoa, as quais são fontes de matéria orgânica e turbidez, limita o descarte destas águas em áreas naturais e a sua reutilização em outras aplicações (DIXO *et al.*, 1995). Além disso, a separação destas algas da fase líquida pode ser uma tarefa complicada, envolvendo o uso de processos, tais como floculação, precipitação e flotação por ar dissolvido, entre outros (WILEY *et al.*, 2009). Um método mais simples para evitar a presença de algas no efluente da lagoa consiste na introdução de macrófitas flutuantes para impedir a passagem da radiação solar para a fase líquida e, conseqüentemente, a reprodução dessas algas (VAN DER STEEN *et al.*, 1999). Por outra parte, estas macrófitas têm também a capacidade de remover nutrientes da fase líquida (CHENG J.J, 2009), apresentam rápido crescimento e, vantajosamente, podem ser facilmente colhidas do meio de cultura utilizando processos de separação simples (MURADOV, 2012).

O presente estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de lagoas de alta taxa



(LAT) de produção de macrófitas (LAT_M) e de algas (LAT_A) no tratamento do efluente de um reator UASB alimentado com esgoto bruto (EB) doméstico. O presente estudo visa contribuir para as pesquisas que estão sendo realizadas visando o desenvolvimento de sistemas simples e de baixo custo para o tratamento de esgoto.

2 Materiais e métodos

2.1 Sistema de tratamento de esgoto

Todos os experimentos foram realizados no Laboratório de Bioenergia e Ambiente do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) na ETE São João Navegantes (Porto Alegre, RS), entre agosto de 2014 e abril de 2015. A estação experimental em escala piloto conta com um reator anaeróbio tipo UASB de $18,3 \text{ m}^3$ seguido de duas LAT idênticas. O reator anaeróbio foi operado em temperatura ambiente com uma vazão média e um TDH de $1,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e 11,8 horas, respectivamente. O efluente do reator foi igualmente distribuído em duas LAT com uma vazão de $0,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. As duas lagoas ($0,3 \text{ m}$ de profundidade e 480 m^2 de área superficial) foram operadas com um TDH de 7,5 dias. A mistura dentro das lagoas foi feita utilizando pás mecanizadas para garantir uma velocidade da água de $0,25 \text{ m s}^{-1}$. As duas LAT foram construídas com taludes inclinados de 45° e revestidas em concreto.

2.2 Operação das lagoas e produtividade de biomassa

Durante os oito meses de estudo, a LAT_A foi operada exclusivamente para produção de algas. Por outro lado, a LAT_M foi operada durante quatro meses para produção de algas (período 1) e durante cinco meses para produção de macrófitas (período 2). O período 2 teve início em dezembro de 2014. Além disso, nos primeiros dois meses do período 2 a densidade de macrófitas não foi controlada (período 2.1). Nos últimos 3 meses do período 2 (período 2.2), a densidade de macrófitas foi mantida em $30\text{-}60 \text{ g m}^{-2}$, b.s. ($500\text{-}1000 \text{ g m}^{-2}$, b.u.) para garantir condições ótimas de crescimento (MONETTE *et al.*, 2006). Um total de 12 kg de macrófitas foram introduzidas na LAT_M no começo do período 2. As macrófitas utilizadas neste estudo foram coletadas numa lagoa de estabilização desativada localizada na estação experimental.

A densidade foi quantificada utilizando um quadro de $0,5 \times 0,5 \text{ m}$ construído com tubos de PVC e tela de aço. A biomassa contida no quadro foi pesada (peso úmido) e levada para a estufa de secagem (peso seco). Esta medição foi realizada duas vezes por semana em seis pontos aleatórios no canal da lagoa. A remoção da biomassa (macrófitas) produzida na LAT_M foi feita duas vezes por semana utilizando uma bomba centrífuga e uma grade para separar as macrófitas da fase líquida. A produtividade de macrófitas na LAT_M foi estimada utilizando o método de variação de densidade de planta na superfície da lagoa (MOHEDANO *et al.*, 2012).

2.3 Análises físicas e químicas

Uma variedade de métodos analíticos foram utilizados para monitorar o desempenho e a estabilidade do sistema de tratamento de esgoto. Para isso, amostras foram coletadas em cada uma das etapas do tratamento e analisadas utilizando métodos padronizados (APHA *et al.*, 1998). As análises de pH ($4500\text{-}H^+$), temperatura, turbidez e concentração de oxigênio dissolvido (OD) foram feitas três vezes por semana. Análises de sólidos totais (2540B), sólidos suspensos totais (SST), demanda química de oxigênio DQO (5220C), NTK (4500-N.C), e Pt (4500-P.J) foram realizadas uma vez por semana. A análise da composição das macrófitas (Weende) foi feita pelo Laboratório de Nutrição Animal do Departamento de



Zootecnia da UFRGS.

2.4 Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa estatístico JMP versão 9 (SAS Institute Inc., SAS Campus Drive, NC, EUA). Análise de variância (ANOVA) foi utilizada para verificar a existência de diferenças significativas. Diferenças entre as médias foram identificadas utilizando o teste de Tukey-Kramer. Todas as conclusões foram baseadas em um nível de significância de $\alpha = 0,05$.

3 Resultados e discussão

3.1 Características do esgoto bruto

As características do EB utilizado neste estudo são apresentadas na tabela 1. O esgoto apresentou características similares às aquelas reportadas para esgotos sanitários de classe “Médios” (TCHOBANOGLOUS *et al.*, 2003).

Tabela 1 – Características do esgoto bruto.

Parâmetro	Média
pH	7,15 $\pm$ 0,2
Turbidez (NTU)	166 $\pm$ 77
OD (mg L ⁻¹)	7,21 $\pm$ 5,7
ST (mg L ⁻¹)	429 $\pm$ 114
SST (mg L ⁻¹)	150 $\pm$ 79
DQO mg (O ₂ L ⁻¹)	306 $\pm$ 118
NTK (mg L ⁻¹)	35,1 $\pm$ 12
PT (mg L ⁻¹)	2,67 $\pm$ 0,8

3.2 Parâmetros de desempenho

Durante os períodos 1, 2.1 e 2.2, as concentração de NTK no EB ficaram na faixa de 33,2 e 36,1 mg L⁻¹. No reator UASB, a concentração de NTK apresentou valores entre 35,5 e 36,9 mg L⁻¹ durante os oito meses de experimento. Após a passagem pelas lagoas, a concentrações de NTK sofreram uma diminuição atingindo valores médios de 19,4 $\pm$ 2,4 (LAT_M) e 19,7 $\pm$ 4,9 mg L⁻¹ (LAT_A). Análises estatísticas indicaram que não houve diferenças significativas entre as concentrações de NTK reportadas nas duas LAT após a entrada das macrófitas. Por outro lado, as diferenças entre as médias observadas no EB e no UASB foram significativas quando comparadas com os valores obtidos nas duas lagoas ($p < 0,05$).

Durante o período 1 de estudo, a concentração de Pt no EB, reator UASB e lagoas de alta taxa foi de 2,62 $\pm$ 0,7, 2,65 $\pm$ 0,3, 1,60 $\pm$ 0,2 (LAT_M) e 1,56 $\pm$ 0,2 (LAT_A) mg L⁻¹, respectivamente. Além disso, as concentrações de fósforo total durante os períodos 2.1 e 2.2 foram similares às observadas durante o período 1 para as diferentes unidades experimentais. As análises estatísticas indicaram que as diferenças entre as concentrações de fósforo total não foram significativas entre os diferentes períodos e entre unidades de tratamento durante o período total de experimento.

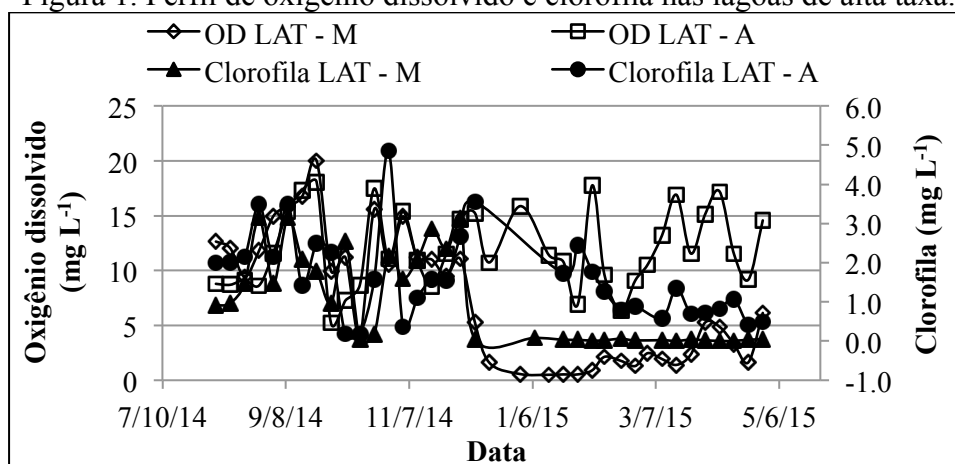
No primeiro período de experimento (1), a temperatura do EB foi de 22,1 $\pm$ 3,1 °C. No mesmo período (1), a temperatura das lagoas apresentou valores entre 22,5 e 22,7 °C. Nos períodos 2.1 e 2.2 de experimento, a temperatura no EB e nas unidades experimentais registraram valores entre 26,7 e 29,5 °C. Análises estatísticas indicaram que houve diferenças



significativas entre as médias de temperatura registradas no período 1 e as observadas no período 2 entre os mesmos sistemas ($p < 0,05$). Em contrapartida, não houve diferenças significativas entre as médias observadas na LAT_M e na LAT_A durante os períodos 2.1 e 2.2 de experimento.

A Figura 1 apresenta o perfil de OD e de clorofila a nas LAT. Durante o período 1, a concentração de clorofila a nas lagoas apresentou valores entre 1,82 e 1,97 mg L^{-1} . A concentração de clorofila a na LAT_M apresentou uma queda após a entrada das macrófitas na lagoa, atingindo valores de 0,02 e 0,04 mg L^{-1} para os períodos 2.1 e 2.2 de experimento, respectivamente. Isto é atribuído à queda na reprodução das algas pela falta de passagem de radiação solar para a fase líquida causado pela presença de macrófitas flutuantes na superfície da lagoa (VAN DER STEEN *et al.*, 1999). Análises estatísticas indicaram que as diferenças entre as concentrações registradas na LAT_M durante o período 1 foram significativas quando comparadas com as concentrações observadas após a entrada das macrófitas na mesma lagoa ($p < 0,05$).

Figura 1. Perfil de oxigênio dissolvido e clorofila nas lagoas de alta taxa.



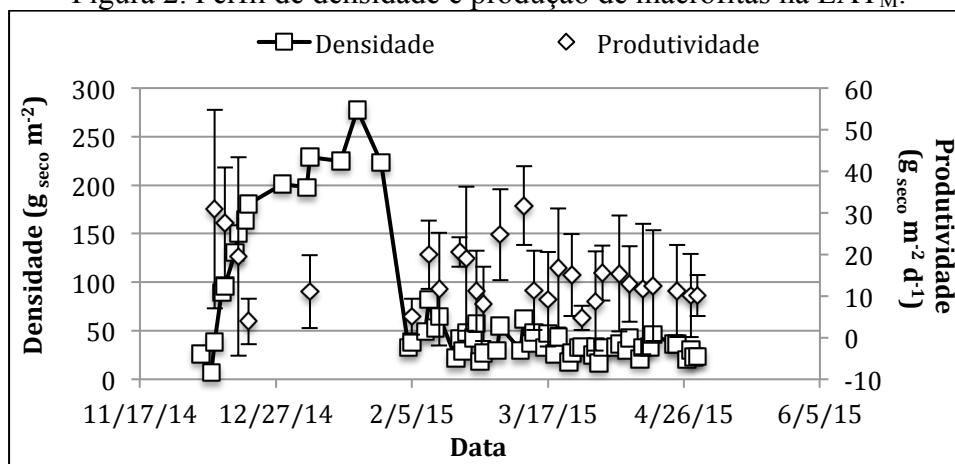
Durante o período 1 de experimento, a concentração de OD nas lagoas apresentou valores entre 11,5 e 12,3 mg L^{-1} . Após a entrada das macrófitas na LAT_M a concentração de OD apresentou uma queda drástica atingindo valores médios de $1,50 \pm 1,91$ e $2,73 \pm 1,67$ mg L^{-1} durante os períodos 2.1 e 2.2, respectivamente (Figura 1). Na LAT_A os valores de OD ficaram na faixa de 11,8 e 12,5 mg L^{-1} . Análises estatísticas revelaram que as médias de concentração de OD observadas na LAT_M durante os períodos 2.1 e 2.2 foram significativamente diferentes das concentrações registradas na LAT_A durante os mesmos períodos ($p < 0,05$). Esta queda nas concentrações de OD na LAT_M é atribuída ao bloqueio da reprodução das algas, impedindo assim os processos de fotossíntese responsáveis pelos incrementos no conteúdo de OD durante o período diurno em lagoas de tratamento de efluentes.

Os resultados de densidade e produção de macrófitas na LAT_M são apresentados na Figura 2. A densidade média de macrófitas durante o período 2.1 foi de 149 ± 82 g m^{-2} , b.s. Durante o período 2.2, quando as macrófitas eram retiradas da lagoa periodicamente, a densidade média foi de $36,5 \pm 13$ g m^{-2} , b.s.. Por outro lado, a produtividade média na LAT_M durante os períodos 2.1 e 2.2 apresentou valores de $18,6 \pm 11$ ($66,1 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, b.s.) e $13,8 \pm 6,3$ ($50,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, b.s.) $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (b.s.), respectivamente. No entanto, as análises estatísticas revelaram que as diferenças entre as médias de produtividade entre os períodos 2.1 e 2.1 não foram significativas. Outras pesquisas nesta área têm reportado produtividades de $18,1 \text{ g m}^{-2}$



d^{-1} , b.s. ($68,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, b.s.) em lagoas de estabilização tratando efluentes da produção de suínos (MOHEDANO *et al.*, 2012).

Figura 2. Perfil de densidade e produção de macrófitas na LAT_M.



3.3 Potencial de aproveitamento

A identificação taxonômica realizada das macrófitas presentes na LAT_M revelou a presença de duas plantas aquáticas, *Spirodela intermedia* W. Koch e *Wolffia columbiana* H. Karst. Ambas plantas pertencem à família Araceae as quais são restritas a América do Sul, Central e Norte, em zonas de climas tropicais e subtropicais com verões úmidos e invernos suaves (POTT, 1999).

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise da composição (sistema Weende) das macrófitas retiradas da LAT_M. Nesta tabela, é possível identificar o alto conteúdo de proteínas e carboidratos na mistura de macrófitas presentes na lagoa. Estudos realizados por Landolt e Kandeler (1987) reportaram conteúdos de proteína entre 15 e 45% em diferentes espécies de Araceae. O conteúdo de proteína encontrado neste estudo é comparável com aqueles reportados para os grãos de soja, os quais podem se encontrar na faixa de 33 e 49% (HYMOWITZ *et al.*, 1972). Por outro lado, conteúdos de amido de até 45,8% têm sido reportados em estudos realizados com *S. polyrrhiza* (CHENG J.J, 2009). Em contrapartida, verifica-se que as macrófitas presentes na lagoa apresentam baixo conteúdo de lipídeos.

Tabela 2 – Análise proximal da composição das macrófitas.

Parâmetro	Valor
Matéria seca (%)	100
Matéria orgânica (%)	76,6
Proteína bruta (%)	35,7
Fibra bruta (%)	12,3
Extrato etéreo (%)	2,23
Cinzas (%)	23,4
Extrato não nitrogenado (%)	26,3

Neste contexto é possível identificar três possíveis formas de aproveitamento da biomassa incluindo alimentação animal, fermentação para produção de etanol, e gasificação para produção de biogás. Assumindo uma produtividade média de biomassa de $58,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$



¹ (b.s.), a mistura de macrófitas tem o potencial de produzir: 15.915,4 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (15,9 t) de proteína que pode ser utilizada para fins de alimentação animal e de 11.724,8 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (11,7 t) carboidratos altamente biodegradáveis para produção de combustíveis renováveis. Além disso, os nutrientes presentes nos efluentes de processos de digestão anaeróbia podem ser aproveitados na produção de adubos orgânicos. A recuperação destes nutrientes é imprescindível para a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícolas.

4 Conclusão

Os resultados deste estudo mostram que grande parte da remoção de nutrientes observada em um sistema de reator UASB seguido por LAT é alcançada na etapa secundária do processo de tratamento. A lagoa de produção de macrófitas (LAT_M) obteve remoções médias de NTK e Pt de 46,9±6,6 e 45,5±6,2 %, respectivamente. A lagoa de produção de algas teve remoções de NTK e Pt de 45,8±14 e 37,8±5,1, respectivamente. Além disso, foi demonstrando o potencial de produção de biomassa utilizando processos simples de tratamento de águas residuárias. As macrófitas produzidas nas lagoas de alta taxa têm o potencial de produzir: 15.915,4 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (15,9 t) de proteína para produção animal, e 11.724,8 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (11,7 t) de carboidratos altamente biodegradáveis que podem ser transformados em combustíveis renováveis. Ainda, os nutrientes recuperados pelas macrófitas podem ser aproveitados em adubos orgânicos, os quais favorecem à sustentabilidade dos sistemas de produção agrícolas.

Referências

APHA; AWWA; WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater. In: Clesceri, L.S., Greenberg, A. E., Eaton, A.D. (Eds.).** Washington, D.C.: American Public Health Association, 1998.

CAVALCANTI, P. F. **Integrated application of the UASB reactor and ponds for domestic sewage treatment in tropical regions. PhD Thesis.** 2003. 155 Wageningen University

CAVALCANTI, P. F.; VAN HAANDEL, A.; LETTINGA, G. Polishing ponds for post-treatment of digested sewage. Part 1: Flow-through ponds. **Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research**, v. 44, n. 4, p. 237-245, 2001.

CHENG J.J, S. A. M. Growing Duckweed to recover nutrients from wastewaters and for production of fuel ethanol and animal feed. **Clean Soil Air Water Clean - Soil, Air, Water**, v. 37, n. 1, p. 17-26, 2009.

DEMIRBAS, A. H.; DEMIRBAS, I. Importance of rural bioenergy for developing countries. **Energy Conversion and Management**, v. 48, n. 8, p. 2386-2398, 2007.

DIXO, N. G. H. et al. Removal of pathogenic organisms from the effluent of an upflow anaerobic digester using waste stabilization ponds. **Water Science and Technology**, v. 31, n. 12, p. 275-284, 1995.



HYMOWITZ, T. et al. Relationship Between the Content of Oil, Protein, and Sugar in Soybean Seed. **Agronomy Journal**, v. 64, n. 5, p. 613-616, 1972.

LANDOLT, E.; KANDELER, R. **Biosystematic investigations in the family of duckweeds (Lemnaceae). Vol. 4, Vol. 2, Vol. 4, Vol. 2.** Zürich: Geobotanisches Institut der ETH, 1987.

MOHEDANO, R. A. et al. High nutrient removal rate from swine wastes and protein biomass production by full-scale duckweed ponds. **Bioresource Technology**, v. 112, n. 0, p. 98-104, 5// 2012.

MONETTE, F. et al. Comprehensive modeling of mat density effect on duckweed (*Lemna minor*) growth under controlled eutrophication. **Water Research**, v. 40, n. 15, p. 2901-2910, 8// 2006.

MURADOV, N. F. B. G. A. C. G. N. T. R. A. Production and characterization of *Lemna minor* bio-char and its catalytic application for biogas reforming. **Biomass and Bioenergy**, v. 42, p. 123-131, 2012.

NIJAGUNA, B. T. **Biogas technology.** New Delhi: New Age International, 2006. p. 298.

POTT, V. J. A familia Lemnaceae Gray no Pantanal (Mato Grosso e Mato Grosso do Sul), Brasil. **Revista Brasileira de Botanica, Sao Paulo**, v. 22, n. 2, p. 153-174, 1999.

SNSA/MCIDADES. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2012.** 2014

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. **Wastewater engineering, treatment, and reuse.** McGraw-Hill, 2003.

VAN DER STEEN, P. et al. Post-treatment of UASB reactor effluent in an integrated duckweed and stabilization pond system. **Water Research**, v. 33, n. 3, p. 615-620, 1999.

WILEY, P. E.; BRENNEMAN, K. J.; JACOBSON, A. E. Improved algal harvesting using suspended air flotation. **Water environment research : a research publication of the Water Environment Federation**, v. 81, n. 7, p. 702-8, 2009.