

Avaliação das Lagoas de Alta Taxa pós-tratando esgoto doméstico de reatores UASB em vistas à qualidade do efluente e codigestão anaeróbia

Artículo largo



Lucas Vassalle^{1,2*}; Alcino Trindade Rosa-Machado¹; Cesar Rossas Mota Filho¹; Ivet Ferrer²; Fabiana Passos¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

²Group of Environmental Engineering and Microbiology (GEMMA), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Espanha

*lucas.vassalle@upc.edu

Resumen

O objetivo desse trabalho foi avaliar a qualidade final do efluente do sistema UASB seguido de Lagoas de Alta Taxa (LAT) em termos de remoção de matéria orgânica, nutrientes e hormônios. Foi também avaliada a codigestão das microalgas, com e sem pré-tratamento. Para isso, dois reatores UASB em escala demonstração foram monitorados em duas fases distintas, com duração de 1 ano cada uma. Os resultados mostraram que a qualidade do efluente do sistema chegou a remoções médias de 70 % de DQO, 70 % de SST, 55 % de amônia e 45 % de fosfato, alcançando valores satisfatórios para lançamento no corpo receptor. Para os hormônios, foram encontradas remoções de até 95 %. Em relação à codigestão, os resultados mostraram um aumento no rendimento de metano de 35 % com microalgas sem pré-tratamento (Fase 1). Um maior rendimento de metano (45 %) foi alcançado após a codigestão das microalgas pré-tratadas (Fase 2).

Palabras clave:

Biogás; Codigestão anaeróbia; Lagoas de alta taxa; Microalgas; Reatores UASB.

High-Rate Algal Ponds assessment treating domestic sewage from UASB reactors in view of effluent quality and anaerobic co-digestion

Abstract

The main objective of this work was to evaluate the final quality of the effluent from the UASB reactors system followed by High-Rate Algal Ponds (HRAP) removing organic matter, nutrients and hormones. It was also evaluated the microalgae co-digestion with and without pre-treatment. For this, two UASB reactors on a demonstration scale were monitored in two distinct phases, for 1 year each. The results showed that the effluent quality of the system had average removals of 70 % COD, 70 % SST, 55 % ammonia and 45 % phosphate, reaching satisfactory values for discharge in the water body. For hormones, removals up to 95 % were found. Regarding co-digestion, the results showed a methane yield increase by 35 % with microalgae without pre-treatment (Phase 1). A higher yield of methane (45 %) was achieved after co-digestion of pre-treated microalgae (Phase 2).

Keywords:

Anaerobic co-digestion; Biogas; High-Rate Algal Ponds; Microalgae; UASB reactors.

Forma de citar: Vassalle, L., Rosa-Machado, A. T., Rossas Mota Filho, C., Ferrer, I., e Passos, F. Avaliação das Lagoas de Alta Taxa pós-tratando esgoto doméstico de reatores UASB em vistas à qualidade do efluente e codigestão anaeróbia. RedBioLAC, 5, 48-54.

Introdução

Atualmente, no Brasil, é notório o déficit no setor de saneamento no qual se destaca o baixo índice de coleta e tratamento de esgoto. Aproximadamente 54 % da população brasileira é atendida com esgoto, e apenas 49 % (aproximadamente 55 milhões de pessoas) tem seu esgoto tratado (Brasil, 2017, 2018). Esse cenário tem graves impactos ambientais e de saúde pública, podendo também ser considerado um desperdício de recursos, dado o grande potencial energético dos esgotos e seus subprodutos de tratamento. O uso desse recurso pode ajudar a diversificar a matriz energética do Brasil, que hoje é baseada em fontes não renováveis. Alternativas simplificadas de coleta e tratamento de esgoto vêm crescendo como uma solução para a universalização do saneamento. Nesse contexto, sistemas de esgoto com processos de tratamento simplificados têm sido a solução preferida no Brasil e na América Latina em relação aos sistemas de esgoto com tratamento convencional (por exemplo, lodo ativado). Noyola *et al.* (2012) avaliaram 2.734 Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) na América Latina e relataram que 67 % das ETEs tinham capacidade de tratamento abaixo de 25 L s⁻¹, sendo classificadas como de pequeno porte. As tecnologias mais comuns relatadas para tratamento de esgoto foram lagoas de estabilização, lodo ativado e reatores de manta de lodo anaeróbio de fluxo ascendente (UASB) (Noyola *et al.*, 2012). No Brasil, os reatores anaeróbios são amplamente utilizados para o tratamento de esgoto doméstico, em particular os reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB) de fluxo ascendente. A principal vantagem dos reatores UASB para tratamento de esgoto é seu baixo custo operacional, associado à capacidade de tratar uma alta vazão e pouca demanda de área. Além disso, o biogás gerado tem alto potencial energético para aproveitamento na estação de tratamento de esgoto (ETE) ou nas comunidades do entorno (Chernicharo *et al.*, 2018).

No entanto, o efluente dos reatores UASB pode não atender a alguns padrões da legislação e, portanto, geralmente requer pós-tratamento (Chernicharo *et al.*, 2018). Sistemas de tratamento de esgotos baseados em microalgas, vem se tornando uma importante opção para a depuração de efluente doméstico, já que, além de eliminar matéria orgânica e outros poluentes (ex.: hormônios e fármacos) essa configuração permite produzir uma biomassa rica em nutrientes. Dentre esses sistemas, destaca-se as lagoas de alta taxa (LATs), que são foto-biorreatores abertos desenvolvidos pela primeira vez na década de 50 na Califórnia (Oswald; Golueke, 1960). Nessas unidades, devido a aeração natural promovida pela fotossíntese realizada pelas microalgas, o consumo energético é aproximadamente 50 % menor quando comparado a sistemas de lodo ativados (Passos *et al.*, 2017). Ademais, a biomassa produzida pode ser processada e valorizada em diferentes produtos, como fertilizantes e biocombustíveis (Arashiro *et al.*, 2020). Uma estratégia amplamente estudada nos últimos anos é a produção de biogás pela digestão anaeróbia, utilizando

as microalgas como substrato. O rendimento teórico de metano obtido a partir das microalgas é estimado entre 0,47 e 0,80 L CH₄ gSV⁻¹ (Sialve *et al.*, 2009). Todavia, na prática, os resultados reportados são menores entre 0,08 e 0,40 L CH₄ gSV⁻¹ (Arias *et al.*, 2018). Um dos principais aspectos que limitam a biodegradabilidade anaeróbia das microalgas é a complexidade da estrutura e composição da parede celular das espécies que são comumente encontradas nesses sistemas (González-Fernández *et al.*, 2012).

Nesse sentido, a digestão simultânea ou, codigestão, das microalgas com diferentes tipos de resíduos advindos do tratamento de água residual doméstica como, lodo primário ou secundário e até mesmo esgoto bruto se tornam uma opção para aumentar a produção de metano em digestores anaeróbios. Essa prática permite o equilíbrio da relação carbono/nitrogênio (C/N), ideal para a digestão anaeróbia (González-Fernández *et al.*, 2012). Aliado à codigestão, o pré-tratamento da biomassa é uma importante estratégia para melhorar a biodegradabilidade das microalgas, antes da digestão anaeróbia (Saratale *et al.*, 2018). Diversas técnicas de pré-tratamento foram aplicadas à biomassa microalgal, incluindo métodos térmicos, mecânicos, biológicos (enzimáticos) e químicos. Dentre eles, o pré-tratamento térmico tem se mostrado uma opção eficaz em termos de aumento de rendimento de metano (60-220 %) (Carrere *et al.*, 2016). Entretanto, uma desvantagem dos pré-tratamentos térmicos convencionais é que eles consomem parte da energia extra produzida pelo sistema. Assim, o uso de um pré-tratamento térmico solar aliviaria essa demanda externa de energia, e apresenta grande potencial para ampla aplicação em países sem variações significativas de temperatura (como países tropicais).

Com base nos desafios descritos e nas lacunas da literatura a serem preenchidas, a presente pesquisa teve como objetivo investigar e avaliar um sistema composto por reator UASB seguido de LAT, com o objetivo de avaliar: i) a eficiência do tratamento em termos da qualidade final do efluente; ii) a codigestão anaeróbia da biomassa microalgal e iii) a codigestão anaeróbia da biomassa microalgal pré-tratada em um sistema solar.

Metodologia

Configuração e operação experimental

A configuração experimental em escala de demonstração é mostrada na **Figura 1**. A instalação recebeu esgoto bruto de uma ETE próxima localizada em Belo Horizonte, Brasil. O esgoto chegava ao sistema por meio de uma bomba (Netzsch® Germany). O estudo foi conduzido em duas fases de duração de 1 ano cada, em dois reatores UASB. Na primeira fase (Fase 1) um dos reatores era o controle (UASB_{cont}). Esse reator era alimentado apenas com esgoto doméstico, enquanto o reator utilizado para avaliar a co-digestão anaeróbia (UASB_{co-dig}) era alimentado

com esgoto doméstico e biomassa de microalgas. Na fase seguinte (Fase 2), o reator controle ($\text{UASB}_{\text{cont}}$), continuou sua operação, enquanto o outro reator era alimentado com esgoto doméstico e biomassa de microalgas pré-tratadas

termicamente em sistema solar ($\text{UASB}_{\text{co-dig-P}}$). Para ambas as fases, um decantador foi utilizado para separar e concentrar a biomassa microalgal do efluente das lagoas.

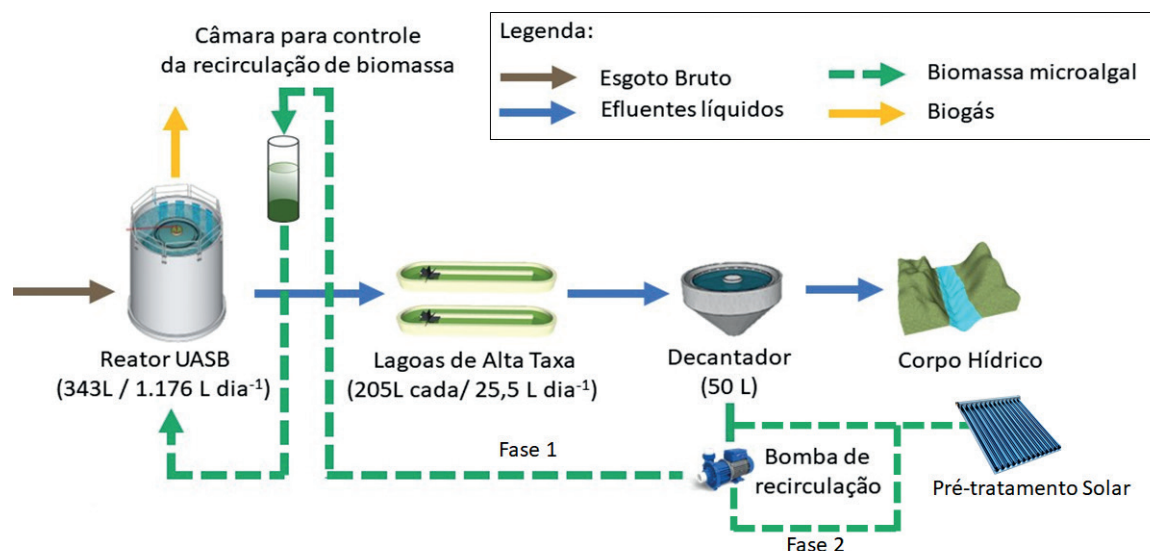


Figura 1 | Fluxograma da configuração experimental da escala de demonstração.

Os reatores UASB eram de fibra de vidro, com volume de trabalho de 343 L cada. Os reatores foram operados com vazão de 49 L h⁻¹, tempo de detenção hidráulica (TDH) de 7 horas. As lagoas eram feitas de fibra de vidro com um volume de trabalho de 205 L e foram operadas com vazão de 25,5 L dia⁻¹ cada, e um TDH de 8 dias. O decantador era feito de PVC, com um volume de trabalho de 30 L. Para a co-digestão, 12 L de biomassa de microalga eram bombeados para uma coluna de acrílico localizada acima do reator avaliado e, recirculada a uma vazão de 0,5 L h⁻¹ para o fundo do reator. A unidade de pré-tratamento solar era composta por 4 tubos de vidro temperado a vácuo comercialmente disponíveis com um volume de trabalho de 3 L cada e um boiler estanque de fibra de vidro com capacidade útil de 16 L. A capacidade total do sistema era de 28 L. A unidade de pré-tratamento foi operada com TDH de 13 horas.

Parâmetros monitorados

Para avaliação da eficiência do tratamento de esgoto, foram retiradas amostras da fase líquida: do esgoto bruto, do efluente dos dois reatores UASB e do efluente das lagoas de alta taxa, duas vezes por semana durante 2 anos. Os parâmetros analisados foram pH (às 10h), temperatura e oxigênio dissolvido (OD) por meio de sonda Hach® (HQ30D). A DQO foi analisada pelo kit Hach® em alta faixa. Sólidos suspensos totais e voláteis (SST e SSV) foram avaliados de acordo com Métodos Padrão (APHA, 2012) e amônio (N-NH₄⁺) por cromatografia iônica usando Metrohm®-940 profissional IC Vario. Ao longo da Fase 1,

foi avaliada a remoção dos hormônios estrona, estradiol, etinilestradiol e estriol no sistema. Foi utilizada a técnica de extração em fase sólida destes compostos, em cartuchos da marca Phenomenex® (Strata X e Strata SAX). As análises dos hormônios foram realizadas em cromatógrafo gasoso acoplado com espectrofotômetro de massas (CG-MS) da marca Shimadzu®. A metodologia completa está descrita por Vassalle *et al.*, 2020.

Para a caracterização da biomassa microalgal, as amostras totais em fase sólida foram retiradas uma vez por semana do decantador. Sólidos totais e voláteis (ST e SV) e Nitrogênio Kjeldahl Total (NTK) foram analisados de acordo com procedimentos padrão (APHA, 2012). A DQO total foi analisada pelo kit Hach® em alta faixa. A avaliação da eficiência do sistema solar foi calculada baseada em metodologia descrita por Vassalle, 2021. Amostras para análise de biogás foram coletadas duas vezes por semana nos reatores UASB de controle e de co-digestão (para as duas fases). A produção de biogás foi medida duas vezes por semana usando medidores Ritter®. Além disso, a caracterização do biogás em termos de CH₄, CO₂, O₂, CO e H₂S foi analisada por meio de medidor portátil da marca Geotech®.

Resultados e discussão

Qualidade do efluente final

A caracterização físico-química dos pontos amostrados estão resumidos na **Tabela 1**. O aumento do pH e OD observado foi devido ao tratamento do efluente anaeróbio

no sistema aeróbio baseado em microalgas. A remoção total de DQO foi em média 55 % para o reator UASB controle e variou entre 44 e 51 % nas fases 1 e 2 respectivamente. Para o sistema a média foi de 70 %. Mesmo considerando que os reatores UASB testados receberam maior carga orgânica devido à recirculação da biomassa microalgal, a remoção de DQO foi consistente, considerando que há um pós-tratamento para esse efluente. Remoções médias de SST e SSV de 70 e 82 % foram observadas para todo o sistema. As concentrações de amônio no efluente anaeróbio variaram de 32 a 39 mg de N-NH_4^+ L^{-1} . No efluente final,

foi observada uma média de remoção de N-NH_4^+ de 55 %. A via de remoção principal do N-NH_4^+ foi provavelmente associada à nitrificação e / ou volatilização. Isso foi confirmado pela alta concentração de nitrato no efluente tratado (6,7 mg L^{-1}). Em termos de fosfato, foi observada uma remoção média de 45 % no sistema. Eficiências de 0 a 65 % foram reportadas para sistemas UASB+LAT. No geral, as concentrações de poluentes no efluente, atenderam aos requisitos da legislação brasileira, que são 180 mg DQO L^{-1} , 150 mg SST L^{-1} e 20 mg N-NH_4^+ L^{-1} (Morais and Santos, 2019).

Tabela 1 | Caracterização físico-química dos diferentes pontos de amostragem do experimento (número de amostras (n) = 55 para todas as colunas, exceto para os parâmetros marcados com *, para os quais n = 32).

Parâmetro	Esgoto Bruto	UASB _{cont}	UASB _{co-dig} (F1)	UASB _{co-dig-P} (F2)	LAT _{efluente}
	Média ± DV	Média ± DV	Média ± DV	Média ± DV	Média ± DV
pH	7,7 ± 0,2	7,3 ± 0,3	7,2 ± 0,2	7,6 ± 0,4	7,7 ± 0,6
OD (mg L^{-1})	0,8 ± 0,9	0,3 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,4 ± 0,2	8,4 ± 5,2
Temperatura (°C)	24,9 ± 1,9	23,3 ± 1,7	22,3 ± 1,5	23,4 ± 2,2	24,8 ± 4,1
DQO (mg O_2 L^{-1})	409,2 ± 119,3	182,7 ± 58,8	197,3 ± 48,2	226,7 ± 72,9	124,7 ± 40,2
SST (mg L^{-1})	237,0 ± 76,8	53,1 ± 13,4	55,1 ± 45,1	72,6 ± 46,0	71,4 ± 21,3
SSV (mg L^{-1})	187,8 ± 64,7	31,3 ± 8,7	30,9 ± 8,1	45,2 ± 27,9	51,8 ± 27,6
NT (mg L^{-1})*	39,9 ± 10,8	40,2 ± 3,6	43,2 ± 4,1	44,5 ± 5,9	26,5 ± 8,0
N-NH_4^+ (mg L^{-1})*	30,9 ± 9,5	32,3 ± 2,8	39,5 ± 7,5	35,5 ± 7,1	14,0 ± 5,7
N-NO_3 (mg L^{-1})*	0,2 ± 0,0	0,2 ± 0,1	0,4 ± 0,1	0,3 ± 0,1	6,7 ± 0,5
N-NO_2 (mg L^{-1})*	0,2 ± 0,0	0,7 ± 0,0	1,1 ± 0,1	0,9 ± 0,1	0,3 ± 0,0
P-PO_4 (mg L^{-1})*	4,9 ± 1,8	2,6 ± 0,8	3,1 ± 0,9	3,9 ± 0,9	2,7 ± 0,5

Nota: Os resultados para Esgoto Bruto, UASB_{cont} e LAT_{efluente}, são a média dos 2 anos de campanha de amostragem. OD – Oxigênio Dissolvido; DQO – Demanda Química de Oxigênio; SST – Sólidos Suspensos Totais; SSV – Sólidos Suspensos Voláteis; N-NH_4^+ – Amônia nitrogenada; N-NO_2 – Nitrito; N-NO_3 – Nitrato; NT – Nitrogênio Total e P-PO_4 – Fosfato.

Remoção de hormônios

As concentrações de Estrona - E1, Estradiol - E2, Etinilestradiol - EE2 e Estriol -E3 nos efluentes do reator UASB e LAT são mostradas na **Figura 2**. Remoções <50 % foram observadas para E1 e E3 após o tratamento UASB, o que está de acordo com publicações anteriores em sistemas anaeróbicos, como reatores de membrana anaeróbia e reatores de tanque agitado completos (Gonzalez-Gil *et al.*, 2016). A baixa remoção de E1 e E3 pode estar associada ao baixo TDH (7 horas) inerente à operação dos reatores UASB. No entanto, E2 foi removido 85 % no reator UASB, mas esta eliminação não foi associada à sua biodegradação e mineralização total, mas sim à sua transformação em E1 em condições anaeróbicas (Adeel *et al.*, 2017). Em contraste, os resultados após as LAT mostraram remoções entre 88 % e 95 % para todos os hormônios avaliados. A remoção de

micropoluentes em LATs está relacionada à bioadsorção, biodegradação, fotodegradação e volatilização (García-Galán *et al.*, 2020).

Eficiência do pré-tratamento solar na solubilização das microalgas com reflexos na produção de biogás

A produção e composição do biogás para ambos os reatores UASB são mostradas na **Tabela 2**. As características do biogás estavam dentro da faixa típica do biogás de reatores UASB tratando esgoto (Silveira, 2015), com 60-85 % de metano (CH_4); 5-15 % de dióxido de carbono (CO_2); 2-25 % de gás nitrogênio (N_2); 0-0,3 % de monóxido de carbono (CO); 0-3 % de hidrogênio (H_2); 0-2 % de oxigênio (O_2); e 1.000-2.000 ppmv (partes por milhão em volume) de sulfureto de hidrogênio (H_2S).

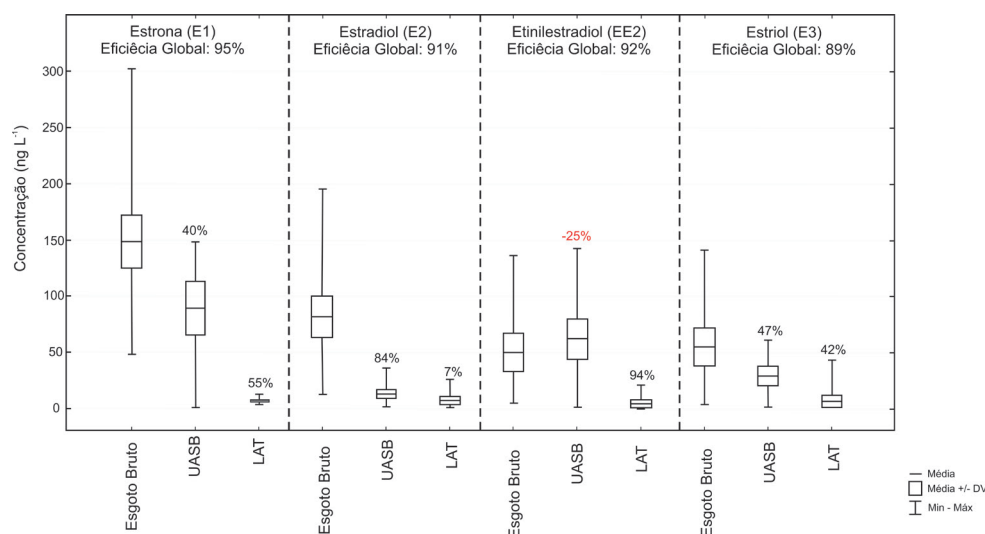


Figura 2 | Concentrações de estrogênios no sistema UASB-LAT. A porcentagem colocada no topo das parcelas refere-se à remoção média observada para o composto no sistema correspondente.

Tabela 2 | Produção e composição do biogás (n = 55).

Parâmetro	UASB _{cont}	UASB _{co-dig} (F1)	UASB _{co-dig;P} (F2)
	Média ± DV	Média ± DV	Média ± DV
Produção de biogás (NL kg ⁻¹ DQO)	141,4 ± 73,8	165,6 ± 71,4	174,9 ± 68,1
Rendimento de metano (NLCH ₄ kg ⁻¹ DQO)	81,3 ± 45,6	105,8 ± 45,4	117,9 ± 46,3
CH ₄ (%)	56,8 ± 7,2	63,6 ± 7,0	67,5 ± 4,7
CO ₂ (%)	5,8 ± 1,2	6,7 ± 5,7	6,7 ± 2,4
O ₂ (%)	0,6 ± 1,3	1,4 ± 2,1	0,9 ± 4,4
CO (ppm)	23,3 ± 9,7	6,8 ± 3,5	26,2 ± 16,1
H ₂ S (ppm)	1603,5 ± 465,6	1843,6 ± 359,7	1649,5 ± 317,4
Balance (%) (N ₂ + H ₂)	36,7 ± 6,8	26,4 ± 9,1	24,9 ± 7,0

Nota: CH₄ – Metano; CO₂ - Dióxido de carbono ; O₂ – Oxigênio; CO – Monóxido de carbono; H₂S – Sulfeto de hidrogênio; N₂ – Nitrogênio; H₂ - Hidrogênio

Observa-se que o rendimento de metano no UASB_{co-dig-P} (Fase2) foi 45 % maior do que no UASB_{cont} (118 vs. 81 NL CH₄ kg⁻¹ DQO), e 12 % maior se comparado com o mesmo reator codigerindo (Fase 1) esgoto bruto e biomassa microalgal sem pré-tratamento (118 vs. 106 NL CH₄ kg⁻¹ DQO). Essa maior produção de biogás e rendimento de metano está associado ao uso do pré-tratamento solar para aumentar a solubilização da biomassa de microalgas

na Fase 2 dessa pesquisa. Os resultados mostraram que há um aumento de 32 % na solubilização da biomassa microalgal após o uso do sistema solar. Na **Tabela 3** é possível ver as características da biomassa antes e após o esse pré-tratamento. Resultados semelhantes (aumento da solubilização de DQO de 29 %) foram obtidos aplicando um pré-tratamento térmico convencional a microalgas a 55 °C por 12 e 24 horas (Alzate *et al.*, 2012).

Tabela 3 | Composição da biomassa microalgal antes e após o pré-tratamento térmico solar (n = 55).

Parâmetro	Biomassa Microalgal antes do Pré-tratamento Solar Térmico		Biomassa Microalgal após o Pré-tratamento Solar Térmico	
	Média ± DV	Min/Max	Média ± DV	Min/Max
DQO _{total} (g L ⁻¹)	3,5 ± 2,3	0,3 / 8,9	3,3 ± 2,1	0,3 / 8,3
DQO _s (g L ⁻¹)	0,5 ± 0,4	0,1 / 1,4	1,3 ± 0,8	0,1 / 3,1
ST (g L ⁻¹)	3,2 ± 2,6	0,4 / 9,8	3,0 ± 2,6	0,1 / 9,5
SV (g L ⁻¹)	2,4 ± 2,1	0,3 / 7,3	2,1 ± 1,8	0,1 / 7,3
SV/ST (%)	73,6 ± 11,8	27,4 / 87,1	72,5 ± 13,1	38,7 / 95,2
NTK (mg L ⁻¹)	172,1 ± 176,7	9,1 / 7,39	182,2 ± 2,33	10,7 / 10,5

A **Figura 3** mostra a temperatura atingida e o aumento da solubilização. Como pode ser observado, houve forte correlação entre temperatura e solubilização da biomassa, o que foi confirmado pelo teste estatístico de Pearson (valor $P < 0,05$ e R^2 de 0,9). Além disso, houve apenas uma variação moderada de temperatura durante o período experimental, embora o sistema de pré-tratamento dependesse da luz solar.

Deve-se notar que este experimento foi realizado em um país tropical, onde a estabilidade da temperatura garantiu a confiabilidade do pré-tratamento térmico da biomassa microalgal. A temperatura de pré-tratamento relatada (55 °C) representa um valor médio ao longo da fase de avaliação do sistema.

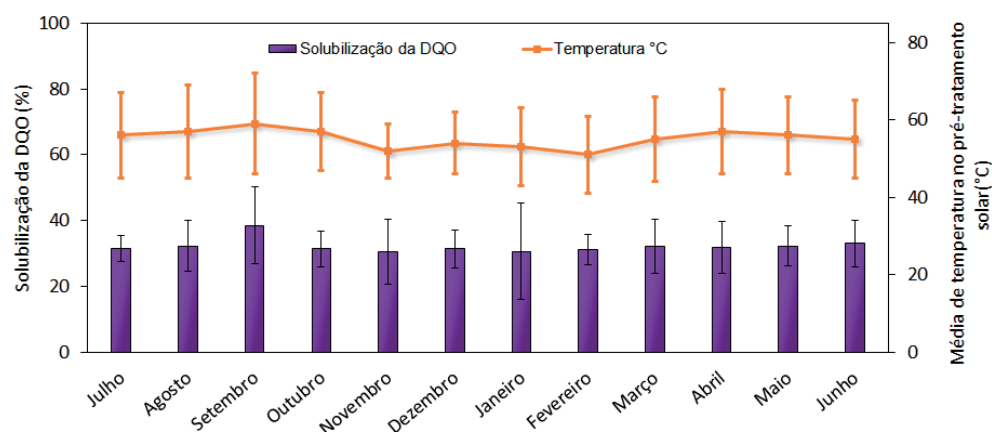


Figura 3 | Solubilização por demanda química de oxigênio (DQO) e temperatura média de pré-tratamento.

Conclusões

Conforme mostrado neste trabalho os resultados obtidos para o sistema de codigestão de microalgas em reator UASB, foram promissores. Apesar de inúmeros estudos avaliarem a codigestão de microalgas em diversos tipos de reatores, a grande variabilidade de resultados apresentados, demonstra que ainda há necessidade de consolidação desta técnica. Especificamente para aplicação das microalgas como um dos substratos na codigestão em reatores UASB, pouco ainda foi estudado, necessitando profunda dedicação ao tema para que se torne uma realidade e possa ser aplicado em escalas maiores.

Para a técnica proposta de utilizar radiação solar para o pré-tratamento térmico de microalgas, também foram observados resultados muito promissores. Alguns pontos importantes como posicionamento da unidade de pré-tratamento e tempo de exposição devem ser considerados para uma boa prática da aplicação desta técnica. Entretanto, assim como a codigestão das microalgas em reatores UASB, o pré-tratamento solar deste substrato, ainda requer muitos avanços e estudos no intuito de implantá-lo em sistemas reais em escala plena.

Agradecimento

Os autores agradecem as seguintes instituições pelo apoio financeiro: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Ministério da Educação -

CNPq; o Instituto de Ciência e Tecnologia em Estações de Tratamento de Esgoto Sustentáveis - INCT ETES Sustentáveis; Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES; Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG; Fundação Nacional de Saúde - FUNASA e Governo da Catalunha (Consolidated Research Group 2017 SGR 1029). Lucas Vassalle agradece ao CNPQ pela bolsa 204026 / 2018-0.

Referências

- Adeel, M., Song, X., Wang, Y., Francis, D., & Yang, Y. (2017). Environmental impact of estrogens on human, animal and plant life: A critical review. *Environment International*, 99, 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.010>
- Alzate, M.E., Muñoz, R., Rogalla, F., Fdz-Polanco, F., & Pérez-Elvira, S.I. (2012). Biochemical methane potential of microalgae: Influence of substrate to inoculum ratio, biomass concentration and pretreatment. *Bioresource Technology*, 123, 488–494. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.113>
- Arashiro, L.T., Ferrer, I., Pániker, C.C., Gómez-Pinchetti, J.L., Rousseau, D.P.L., Van Hulle, S.W.H., & Garfi, M. (2020). Natural pigments and biogas recovery from microalgae grown in wastewater. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8, 29, 10691–10701. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c01106>

- Arias, D. M., Solé-Bundó, M., Garfí, M., Ferrer, I., García, J., & Uggetti, E. (2018). Integrating microalgae tertiary treatment into activated sludge systems for energy and nutrients recovery from wastewater. *Bioresource Technology*, 247, 513–519. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.123>
- Brasil, 2018. Diagnosis of Water and Sewage Services - 2018.
- Brasil, 2017. Atlas Sewers - Depollution of watersheds.
- Carrere, H., Antonopoulou, G., Affes, R., Passos, F., Battimelli, A., Lyberatos, G., & Ferrer, I. (2016). Review of feedstock pretreatment strategies for improved anaerobic digestion: From lab-scale research to full-scale application. *Bioresource Technology*, 199, 386–397. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.007>
- Chernicharo, C.A. de L., Ribeiro, T.B., Garcia, G.B., Lermontov, A., Platzer, C.J., Possetti, G.R.C., & Rosseto, M.A.L.L.R. (2018). Overview of sewage treatment in the South, Southeast and Midwest regions of Brazil: most employed technologies. *Revista DAE*, 66 (213), 5-19. <https://doi.org/10.4322/dae.2018.028>
- García-Galán, M.J., Monllor-Alcaraz, L.S., Postigo, C., Uggetti, E., López de Alda, M., García, J., & Díez-Montero, R. (2020). Microalgae-based bioremediation of water contaminated by pesticides in peri-urban agricultural areas. *Environmental Pollution*, 265 (part B), 114579. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114579>
- González-Fernández, C., Sialve, B., Bernet, N., & Steyer, J.P. (2011). Impact of microalgae characteristics on their conversion to biofuel. Part II: Focus on biomethane production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(2), 205-218. <https://doi.org/10.1002/bbb.337>
- Gonzalez-Gil, L., Papa, M., Feretti, D., Ceretti, E., Mazzoleni, G., Steimberg, N., Pedrazzani, R., Bertanza, G., Lema, J.M., & Carballa, M. (2016). Is anaerobic digestion effective for the removal of organic micropollutants and biological activities from sewage sludge? *Water research*, 102, 211-220. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.06.025>
- Morais, N. W. S., & dos Santos, A. B. (2019). Analysis of effluent discharge standards in water bodies and reuse of wastewater from various Brazilian states. *Revista DAE*, 67, 40–55. <https://doi.org/10.4322/dae.2019.004>
- Noyola, A., Padilla-Rivera, A., Morgan-Sagastume, J.M., Güereca, L.P., & Hernández-Padilla, F. (2012). Typology of Municipal Wastewater Treatment Technologies in Latin America. *Clean–Soil, Air, Water*, 40(9), 926-932. <https://doi.org/10.1002/clen.201100707>
- Oswald, W.J., & Golueke, C.G. (1960). Biological Transformation of Solar Energy. *Advances in Applied Microbiology*, Microbiol. 2, 223–262. [https://doi.org/10.1016/S0065-2164\(08\)70127-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2164(08)70127-8)
- Passos, F., Gutiérrez, R., Uggetti, E., Garfí, M., García, J., & Ferrer, I. (2017). Towards energy neutral microalgae-based wastewater treatment plants. *Algal Research*, 28, 235–243. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.11.006>
- Saratale, R.G., Kumar, G., Banu, R., Xia, A., Periyasamy, S., & Dattatraya Saratale, G. (2018). A critical review on anaerobic digestion of microalgae and macroalgae and co-digestion of biomass for enhanced methane generation. *Bioresource Technology*, 262, 319-332. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.030>
- Sialve, B., Bernet, N., & Bernard, O. (2009). Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgae biodiesel sustainable. *Biotechnology advances*, 27(4), 409-416. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.03.001>
- Silveira, B. (2015). Technical guide to use biogas in sewage treatment statements, Ministry of Cities / Wolfgang Roller.
- Vassalle, L. (2021). High rate algal ponds for post-treating sewage from uasb reactors: treatment efficiency, anaerobic co-digestion and sustainability. *Universitat Politècnica de Catalunya*.
- Vassalle, L., García-Galan, M.J., de Aquinoc, S.F., Afonso, R.J. de C.F., Ferrer, I., Passos, F., & Filho, C.R.M. (2020). Can high rate algal ponds be used as post-treatment of UASB reactors to remove micropollutants? *Chemosphere*, 248, 125969. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125969>