

## II-1135 – LAGOAS DE ALTA TAXA: UMA OPÇÃO SUSTENTÁVEL PARA O PÓS-TRATAMENTO DE REATORES UASB EM VISTAS À QUALIDADE DO EFLUENTE E CODIGESTÃO ANAERÓBIA

### **Lucas Vassalle** <sup>(1)</sup>

Engenheiro Ambiental pela Fundação Mineira de Educação e Cultura (FUMEC). Mestre e Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais e em Engenharia Ambiental pela Universidade Politécnica da Catalunha - UPC (Espanha). Sócio-diretor do Centro de Referência em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto.

### **Lívia Cristina da Silva Lobato** <sup>(1)</sup>

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais. Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais. Sócia-diretora do Centro de Referência em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto.

### **Alcino Trindade Rosa Machado** <sup>(1)</sup>

Engenheiro Civil pela UniBH. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais.

### **Cesar Rossas Mota Filho** <sup>(1)</sup>

Engenheiro Civil pela Universidade do Federal do Ceará. Doutor em Engenharia Civil e Ambiental pela North Carolina State University (EUA). Professor Associado no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais.

### **Fabiana Passos** <sup>(1)</sup>

Engenheira Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa. Doutora em Engenharia Ambiental pela Universidade Politécnica da Catalunha - UPC (Espanha). Professora adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais.

**Endereço**<sup>(1)</sup>: Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Campus Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP: 31270-901 - Brasil - e-mail: [lucas.vassalle@cretes.com.br](mailto:lucas.vassalle@cretes.com.br)

## **RESUMO**

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. Os resultados obtidos mostraram que a qualidade do efluente do sistema chegou a remoções médias de 70% de DQO, 70% de SST, 55% amônia e 45% de fosfato, alcançando valores satisfatórios para lançamento no corpo receptor. Para os hormônios, remoções de até 95% foram encontradas. Em relação a 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).

**Palavras-chave:** Biogás; Codigestão anaeróbia; Lagoas de alta taxa; Microalgas; Reatores UASB.

## **INTRODUÇÃO**

Atualmente, no Brasil, é notório o déficit no setor de saneamento, em que se destaca o baixo índice de coleta e tratamento de esgoto. Aproximadamente 54% da população brasileira é atendida com coleta de 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 elevado potencial de aproveitamento dos subprodutos do tratamento de esgoto. O aproveitamento energético do biogás, um desses subprodutos, pode ajudar a diversificar a matriz energética do Brasil. 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 mais adotada no Brasil e na América Latina. 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<sup>-1</sup>, sendo classificadas como de pequeno porte. As tecnologias mais comuns

relatadas para tratamento de esgoto foram lagoas de estabilização, lodo ativado e reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB). No Brasil, os reatores anaeróbios são amplamente utilizados para o tratamento de esgoto sanitário, em particular os reatores UASB. A principal vantagem dos reatores UASB para tratamento de esgoto é seu baixo custo operacional, associado à capacidade de tratar uma alta vazão com pouca demanda de área. Além disso, o biogás gerado, por ser composto majoritariamente por metano ( $\text{CH}_4$ ) que possui um elevado poder calorífico, 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 esgoto baseados em microalgas vem se tornando uma importante opção para a depuração de efluente sanitáriosanitário, 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  $\text{CH}_4$  gSV<sup>-1</sup> (Sialve *et al.*, 2009). Todavia, na prática, os resultados reportados são menores entre 0,08 e 0,40 L  $\text{CH}_4$  gSV<sup>-1</sup> (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 esgoto sanitário 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).

## OBJETIVO

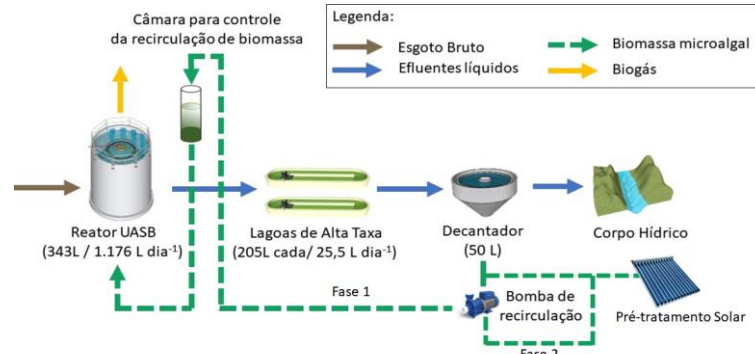
Com base nos desafios descritos e nas lacunas da literatura a serem preenchidas, o presente trabalho teve como objetivo investigar um sistema composto por reator UASB seguido de LAT, com o objetivo de avaliar: i) a eficiência do tratamento em termos da qualidade final do efluente; ii) a codigestão anaeróbia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

## MATERIAL E MÉTODOS

### Configuração e operação experimental

A configuração experimental em escala de demonstração é apresentada na Figura 1. A instalação recebeu esgoto sanitário (majoritariamente doméstico), após passar por tratamento preliminar, de uma ETE próxima localizada em Belo Horizonte, Brasil. 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<sub>cont</sub>). Esse reator era alimentado apenas com esgoto sanitáriosanitário, enquanto o reator utilizado para avaliar a co-digestão anaeróbia (UASB<sub>co-dig</sub>) era alimentado com esgoto sanitário e biomassa de microalgas. Na fase seguinte (Fase 2), o reator controle (UASB<sub>cont</sub>) continuou em operação, enquanto o outro reator era alimentado com esgoto sanitáriosanitário e biomassa de microalgas pré-tratadas termicamente em sistema solar (UASB<sub>co-dig-p</sub>). 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, e operados com vazão de 49 L h<sup>-1</sup> e tempo de detenção hidráulica (TDH) de 7 horas. As lagoas eram de fibra de vidro com um volume de trabalho de 205 L, e operadas com vazão de 25,5 L dia<sup>-1</sup> cada e um TDH de 8 dias. O decantador era de PVC, com um volume de trabalho de 30 L. Para a codigestão, 12 L de biomassa de microalgas eram bombeados para uma coluna de acrílico localizada acima do reator avaliado e recirculada a uma vazão de 0,5 L h<sup>-1</sup> 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 da unidade de pré-tratamento era de 28 L, operada com TDH de 13 horas.

### Parâmetros monitorados

Para avaliação da eficiência do tratamento de esgoto, foram retiradas amostras da fase líquida - esgoto bruto, efluente dos dois reatores UASB e 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-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) 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 em 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 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO e H<sub>2</sub>S foi analisada por meio de medidor portátil da marca Geotech®.

## RESULTADOS

### Qualidade do efluente final

A caracterização físico-química dos pontos amostrados estão resumidos na Tabela 1. O aumento do pH e OD observado na LAT 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 reator UASB-LAT, 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 principal via de remoção 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 até 65% foram reportadas para sistemas UASB+LAT (Vassalle et al. 2020). No geral, as concentrações de poluentes no efluente, atenderam aos requisitos da legislação brasileira, quais sejam: 180 mg DQO  $L^{-1}$ , 150 mg SST  $L^{-1}$  e 20 mg  $N-NH_4^+$   $L^{-1}$  (COPAM-CERH/MG nº 8/2022).

**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)

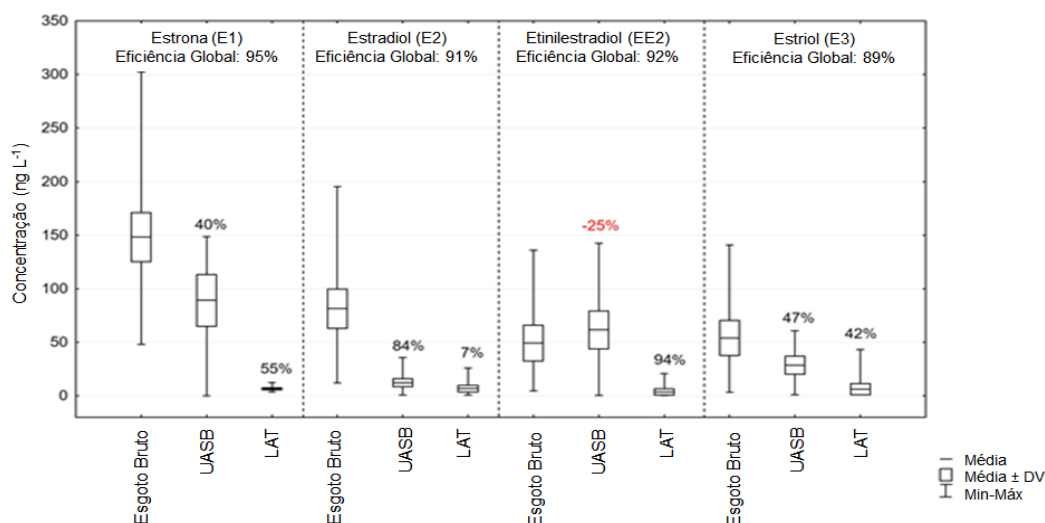
Parâmetro	Esgoto Bruto	UASB <sub>cont</sub>	UASB <sub>co-dig</sub> (F1)	UASB <sub>co-dig-P</sub> (F2)	LAT <sub>efluente</sub>
	Média ± DV	Média ± DV	Média ± DV	Média ± DV	Média ± DV
pH	7,7 ± 0,2	7,3 ± 0,3	7,2 ± 0,2	7,6 ± 0,4	7,7 ± 0,6
OD (mg $L^{-1}$ )	0,8 ± 0,9	0,3 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,4 ± 0,2	8,4 ± 5,2
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<sub>cont</sub> e LAT<sub>efluente</sub>, 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; TN – 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 apresentadas na Figura 2. Remoções inferiores a 50% foram observadas para E1 e E3 após o tratamento por reator UASB, o que está de acordo com publicações anteriores em sistemas anaeróbicos, como reatores de membrana anaeróbia e reatores com mistura completa (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, para E2, a remoção foi de 85% no reator UASB. 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).



**Figura 2:** Concentrações de estrogênicos no sistema UASB-LAT.

**Nota:** A porcentagem colocada no topo das parcelas refere-se à remoção média observada para o composto no sistema correspondente.

### 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 apresentados na Tabela 2. As características do biogás estavam dentro das concentrações típicas esperadas em biogás de reatores UASB tratando esgoto sanitário (Silveira, 2015), com 60-85% de metano (CH<sub>4</sub>); 5-15% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); 2-25% de gás nitrogênio (N<sub>2</sub>); 0-0,3% de monóxido de carbono (CO); 0-3% de hidrogênio (H<sub>2</sub>); 0-2% de oxigênio (O<sub>2</sub>); e 1.000-2.000 ppmv (partes por milhão em volume) de sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S).

**Tabela 2:** Produção e composição do biogás (n = 55)

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

**Nota:** CH<sub>4</sub> – Metano; CO<sub>2</sub> - Dióxido de carbono; O<sub>2</sub> – Oxigênio; CO – Monóxido de carbono; H<sub>2</sub>S – Sulfeto de hidrogênio; N<sub>2</sub> – Nitrogênio; H<sub>2</sub> - Hidrogênio

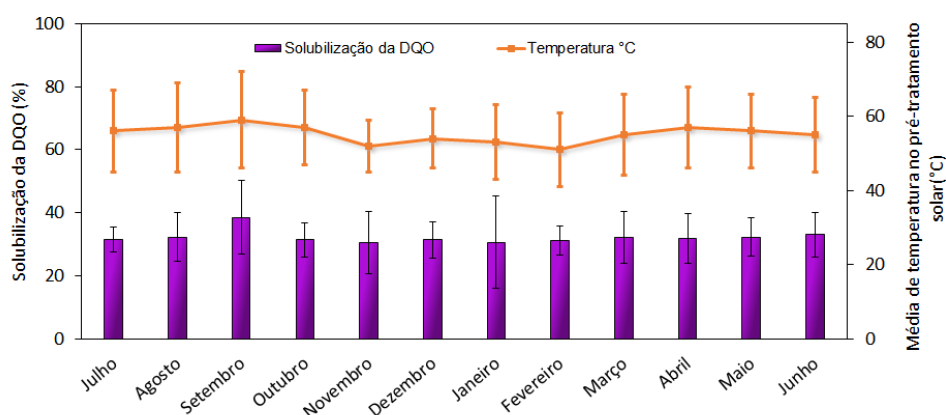
Observa-se que o rendimento de metano no UASB<sub>co-dig;P</sub> (Fase2) foi 45% maior do que no UASB<sub>cont</sub> (118 vs. 81 NL CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup> DQO), e 12% maior se comparado com o mesmo reator codigerindo (Fase 1) esgoto bruto e biomassa microalgal sem pré-tratamento (118 vs. 106 NL CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup> 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 são apresentadas as características da biomassa antes e após o pré-tratamento. Resultados semelhantes (aumento da solubilização

de COD de 29%) foram obtidos aplicando um pré-tratamento térmico convencional à 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 <sub>total</sub> (g L <sup>-1</sup> )	3,5 ± 2,3	0,3 / 8,9	3,3 ± 2,1	0,3 / 8,3
DQO <sub>s</sub> (g L <sup>-1</sup> )	0,5 ± 0,4	0,1 / 1,4	1,3 ± 0,8	0,1 / 3,1
ST (g L <sup>-1</sup> )	3,2 ± 2,6	0,4 / 9,8	3,0 ± 2,6	0,1 / 9,5
SV (g L <sup>-1</sup> )	2,4 ± 2,1	0,3 / 7,3	2,1 ± 1,8	0,1 / 7,3
VS/TS (%)	73,6 ± 11,8	27,4 / 87,1	72,5 ± 13,1	38,7 / 95,2
NTK (mg L <sup>-1</sup> )	172,1 ± 176,7	9,1 / 7,39	182,2 ± 2,33	10,7 / 10,5

Na Figura 3 é apresentada 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<sup>2</sup> 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 são 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 avanços e estudos no intuito de implantá-lo em sistemas em escala plena.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Regulatório de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da Agência Reguladora de Serviços de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário do Estado de Minas Gerais – ARSAE-MG e à Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Adeel, M., Song, X., Wang, Y., Francis, D., Yang, Y., 2017. Environmental impact of estrogens on human, animal and plant life: A critical review. *Environ. Int.* 99, 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.010>
2. 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. *Bioresour. Technol.* 123, 488–494. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.113>
3. Arashiro, L.T., Ferrer, I., Pániker, C.C., Gómez-Pinchetti, J.L., Rousseau, D.P.L., Van Hulle, S.W.H., Garfí, M., 2020. Natural pigments and biogas recovery from microalgae grown in wastewater. *ACS Sustain. Chem. Eng.* <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c01106>
4. Arias, Dulce Maria, 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. *Bioresour. Technol.* 247, 513–519. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.123>
5. Brasil, 2018. *Diagnosis of Water and Sewage Services - 2018.*
6. Brasil, 2017. *Atlas Sewers - Depollution of watersheds.*
7. 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. *Bioresour. Technol.* 199, 386–397. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.007>
8. 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. *Rev. DAE* 66, 5–19. <https://doi.org/10.4322/dae.2018.028>
9. 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. *Environ. Pollut.*
10. 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, Bioprod. Biorefining* 6, 205–218. <https://doi.org/10.1002/bbb.337>
11. 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 Res.* 102, 211–220. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.06.025>
12. Morais, N.W.S., Santos, A.B. dos, 2019. Analysis of effluent discharge standards in water bodies and reuse of wastewater from various Brazilian states. *Rev. DAE* 67, 40–55. <https://doi.org/10.4322/dae.2019.004>
13. 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, 926–932. <https://doi.org/10.1002/clen.201100707>
14. Oswald, W.J., Golueke, C.G., 1960. Biological Transformation of Solar Energy. *Adv. Appl. Microbiol.* 2, 223–262. [https://doi.org/10.1016/S0065-2164\(08\)70127-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2164(08)70127-8)
15. Passos, F., Gutiérrez, R., Uggetti, E., Garfí, M., García, J., Ferrer, I., 2017. Towards energy neutral microalgae-based wastewater treatment plants. *Algal Res.* 28, 235–243. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.11.006>
16. 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. *Bioresour. Technol.* <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.030>
17. Sialve, B., Bernet, N., Bernard, O., 2009. Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgae biodiesel sustainable. *Biotechnol. Adv.* 27, 409–416. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.03.001>
18. Silveira, B., 2015. *Technical guide to use biogas in sewage treatment statements*, Ministry of Cities / Wolfgang Roller.
19. 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.*
20. Vassalle, L., García-Galan, M.J., de Aquino, 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* 125969. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125969>