

## EFICIÊNCIA DE AERAÇÃO E CONSUMO DE OXIGÊNIO NO TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DO PROCESSAMENTO DOS FRUTOS DO CAFEIEIRO EM SISTEMA DE AERAÇÃO EM CASCATA

Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n5p941-950/2015>

ANTONIO T. MATOS<sup>1</sup>, VALDEIR EUSTÁQUIO JÚNIOR<sup>2</sup>, MATEUS P. DE MATOS<sup>3</sup>

**RESUMO:** Objetivou-se, com a realização deste trabalho, determinar a eficiência de aeração e a capacidade do sistema de aeração em cascata em remover matéria orgânica da água residuária do processamento dos frutos do cafeeiro (ARC). O sistema de aeração foi constituído por cascata com 4,14 m de altura, distribuída em 23 degraus (altura, largura e comprimento de 0,18; 0,32 e 0,60 m, respectivamente), reservatório para a recepção/detenção da ARC escoada, por três horas, e reservatório de distribuição, de onde era recirculada no sistema. Durante a fase experimental, o sistema de tratamento ficou em operação por trinta dias, sendo a ARC recirculada três vezes por dia, numa vazão constante de  $1 \text{ L s}^{-1}$ , e substituída a cada dez dias. A cada recirculação, amostras do afluyente e efluente foram coletadas e analisadas. Com a utilização do sistema de aeração em cascatas, foi possível incorporar, em média,  $0,2 \text{ mg L}^{-1}$  de oxigênio a cada lance de 1 m de degraus na cascata. A eficiência de aeração na cascata foi de 0,128 ou 0,141, dependendo se foi considerado ou não o efeito salino na ARC. A alta concentração de material orgânico não permitiu que se detectassem grandes alterações na concentração de oxigênio dissolvido na ARC. O tempo de detenção ideal da ARC no tanque de recepção/detenção foi de 26 min.

**PALAVRAS-CHAVE:** tratamento aeróbio, resíduos orgânicos, frutos do cafeeiro.

## AERATION EFFICIENCY AND OXYGEN CONSUMPTION IN THE TREATMENT OF WASTEWATER FROM COFFEE FRUIT PROCESSING USING A CASCADE AERATION SYSTEM

**ABSTRACT:** This study aimed at assessing the efficiency of aeration and organic matter removal of a cascade aeration system treating wastewater derived from coffee fruit processing (CW). The system consisted of one 4.14-m cascade with 23 steps (height, width and length of 0.18, 0.32 and 0.60 m, respectively), one receiving tank to store CW for three hours and one distribution tank, from which it was recirculated through the system. The system remained operating for thirty days during which CW recirculated three times a day under a constant flow rate of  $1 \text{ L s}^{-1}$  and being replaced every ten days. In each recirculation cycle, samples of effluent and affluent were collected and analyzed. The cascade aeration system incorporated an average of  $0.2 \text{ mg L}^{-1}$  of oxygen every one meter of cascade steps. The aeration efficiency was 0.128 or 0.141 depending whether or not salt effect on CW was considered. The high concentration of organic material in CW hampered the detection of major changes in dissolved oxygen contents. We also found that 26 minutes was the ideal time to maintain CW in the receiving tank.

**KEYWORDS:** Aerobic treatment, Organic residue, Coffee fruit.

## INTRODUÇÃO

A água residuária da lavagem e do descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro (ARC), além de apresentar alto conteúdo de matéria orgânica, é constituída por nitrogênio total, fósforo

<sup>1</sup> Eng<sup>o</sup> Agrícola, Prof. Doutor, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG/Belo Horizonte – MG, Fone: (31) 3409 1960, [atmatos@desa.ufmg.br](mailto:atmatos@desa.ufmg.br)

<sup>2</sup> Eng<sup>o</sup> Agrícola e Ambiental, Prof. Mestre, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - Campus Cambuci, IFF/Cambuci-RJ, [valdeir.junior@iff.edu.br](mailto:valdeir.junior@iff.edu.br)

<sup>3</sup> Eng<sup>o</sup> Agrícola e Ambiental, Prof. Doutor, Departamento de Engenharia, UFLA/Lavras – MG, [matmatos\\_eaa@yahoo.com.br](mailto:matmatos_eaa@yahoo.com.br)

Recebido pelo Conselho Editorial em: 10-4-2014

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 30-3-2015

total, sódio e, principalmente, potássio e, se lançada sem tratamento em corpos hídricos, pode causar diversos impactos ambientais (RIBEIRO et al., 2009; FIA et al., 2010a, 2010b; OLIVEIRA & BRUNO, 2013).

A Zona da Mata Mineira é uma região montanhosa que tem cerca de 70% da área total dominada por terrenos de vertentes e, portanto, de elevadas declividades. Considerando-se que a disponibilidade de áreas de baixa declividade, imprescindíveis para a construção de sistemas de tratamento da ARC, é rara na região, torna-se necessário o desenvolvimento de tecnologias de tratamento mais apropriadas e exequíveis para este tipo de conformação topográfica.

Dentre os vários sistemas propostos para o tratamento da ARC, os sistemas de aeração em cascata podem ser uma alternativa apropriada para implantação em regiões de elevada declividade, já que apresentam como principais vantagens o baixo custo de implantação e operação, e possibilitam o aproveitamento das condições naturais do local.

Cascatas de aeração são unidades, normalmente localizadas a jusante das estações de tratamento de efluentes, que visam à elevação da concentração de oxigênio dissolvido, antes de seu lançamento em curso d'água receptor. Esses sistemas podem ser constituídos por uma série de degraus e são muito eficientes na aeração, em decorrência da forte mistura turbulenta que proporciona grande tempo de residência, além do substancial borbulhamento da água, quando o escoamento ocorrer em lâminas de baixa profundidade e quedas sequenciais (BAGATUR, 2009, BAYLAR et al., 2009; RATHINAKUMAR et al., 2014). Esses sistemas têm sido utilizados na pré-aeração de água bruta, para remoção de sais manganosos ou ferrosos (KUMAR et al., 2013) e proporcionar a introdução de oxigênio e nitrogênio atmosférico e exaustão de compostos orgânicos voláteis (BAGATUR, 2009; BAYLAR et al., 2009; ZAT & BENETTI, 2011; RATHINAKUMAR et al., 2014), bem como na pós-aeração de água residuária tratada (KUMAR et al., 2013). RATHINAKUMAR et al. (2014) consideram a utilização de cascatas importante alternativa para tratamento tanto de água, para fins de potabilidade, como águas residuárias diversas.

No escoamento em queda totalmente livre nas cascatas, a entrada de ar ocorre tanto pela superfície superior como pela inferior da lâmina de água. Na camada inferior da lâmina de água, o desenvolvimento de uma camada cisalhante é caracterizado pelo alto nível de turbulência, e uma substancial entrada de ar interfacial é observada, o que leva à maior eficiência de aeração comparativamente a outras formas de escoamento na cascata (BAYLAR et al., 2011).

Existem muitas equações desenvolvidas para diversos tipos de estruturas hidráulicas utilizadas como aeradores em cascata. BAGATUR (2009) apresentou modelos matemáticos para otimização no projeto de aeradores em cascata, enfatizando a eficiência de aeração individual de cada degrau. Segundo BAYLAR et al. (2009), a taxa de transferência de oxigênio, isto é, do gás (bolhas de ar) para a fase líquida (água), pode ser descrita matematicamente por:

$$dC/dt = K_L \times (C_s - C) \times A/V \quad (1)$$

em que,

C é a concentração de oxigênio dissolvido;

$K_L$  é o coeficiente de filme líquido para oxigênio;

A é a área superficial associada com o volume V no qual a transferência ocorre;

$C_s$  é a concentração de saturação de oxigênio, e

t é o tempo.

Assumindo-se  $C_s$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ) constante em relação ao tempo, a eficiência de aeração,  $E_a$  (adimensional), pode ser definida por:

$$E_a = (C_e - C_a)/(C_s - C_a) \quad (2)$$

em que,

$C_e$  é a concentração de oxigênio dissolvido no efluente (jusante) ( $\text{mg L}^{-1}$ ),

$C_o$  é a concentração de oxigênio dissolvido no afluente (montante) ( $\text{mg L}^{-1}$ ).

Considerando-se que, em águas residuárias, a difusão do oxigênio no meio líquido é dificultada pela presença de íons e substâncias em solução (RATHINAKUMAR et al., 2014), acredita-se que maiores eficiências na incorporação de oxigênio no meio líquido, e, conseqüentemente, na oxidação do material orgânico por microorganismos aeróbios, podem ser obtidas caso sejam construídos de tanques de recepção/detenção ao final de cada lance de degraus. Isso decorre do fato de que, assim, proporcionaria maior tempo para que a difusão do oxigênio ocorra no meio líquido.

Estudos relativos ao sistema de aeração em cascatas tornam-se necessários, tendo em vista que os processos envolvidos precisam ser mais bem compreendidos para que se possa otimizar sua utilização no tratamento de águas residuárias, dentre as quais, da ARC. Assim, com a realização deste trabalho, objetivou-se determinar a eficiência do sistema de aeração em cascata no tratamento da ARC, considerando-se ou não, nos cálculos, a presença de substâncias dissolvidas, além de avaliar a influência do tempo de detenção em tanques nos valores de concentração de oxigênio dissolvido e demanda química de oxigênio nessa água residuária.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi implantado e conduzido na Área Experimental de Tratamentos de Resíduos do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa – DEA/UFV, em Viçosa, Minas Gerais, tendo como coordenadas geográficas: latitude  $20^{\circ} 46' 24''$  S, longitude  $42^{\circ} 52' 21''$  W e altitude de 662 m.

A ARC utilizada no experimento foi proveniente do Sítio Jatobá, propriedade agrícola situada a 12 km da cidade de Viçosa. O consumo médio de água no local é de  $2,5 \text{ L L}^{-1}$  de grãos processados, pois há recirculação de água no processo. Os grãos eram lavados e descascados/despolidos, tendo parte da polpa removida.

Durante a fase experimental, a operação do sistema de tratamento ocorreu por 30 dias (de 18-05 a 16-06-2010), tendo sido efetuadas três diferentes coletas de ARC (obtidas em diferentes épocas do processamento dos frutos do cafeeiro) e, a cada 10 dias, a ARC era substituída no sistema em avaliação. Durante esse período, a temperatura da ARC sempre esteve abaixo de  $22,5^{\circ}\text{C}$ , tendo sido verificados os mais baixos valores no período de inverno, ocasião em que a temperatura ficou abaixo de  $20^{\circ}\text{C}$ . As principais características físicas e químicas da ARC utilizada no experimento estão apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1. Principais características químicas, físicas e bioquímicas das coletas de ARC utilizadas no experimento. **Major chemical, physical and biochemical characteristics of the CW samples used in the experiment.**

Variáveis	Unidade	Coleta			Média
		1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	
pH		3,4	4,3	3,8	3,9 ± 0,5
T	°C	21,5	19,5	19,0	20,0 ± 1,3
CE	dS m <sup>-1</sup>	1,08	2,65	1,28	1,64 ± 0,80
OD	mg L <sup>-1</sup>	0	0	0	0
DQO	mg L <sup>-1</sup>	9345	20858	12409	14204 ± 5962
DBO	mg L <sup>-1</sup>	3860	6727	3979	4855 ± 1622
ST	mg L <sup>-1</sup>	4626	14564	17329	12173 ± 6681
SVT	mg L <sup>-1</sup>	3965	12305	16306	10859 ± 6296
SFT	mg L <sup>-1</sup>	661	2259	1023	1314 ± 838
SST	mg L <sup>-1</sup>	214	860	648	574 ± 329
SSV	mg L <sup>-1</sup>	188	770	618	525 ± 302
SSF	mg L <sup>-1</sup>	26	90	30	48,7 ± 35,9
SP	mL L <sup>-1</sup>	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
CF	mg L <sup>-1</sup>	60,7	309,8	133,8	168 ± 128
Na <sub>T</sub>	mg L <sup>-1</sup>	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
P <sub>T</sub>	mg L <sup>-1</sup>	24,3	53,0	21,0	32,7 ± 17,6
K <sub>T</sub>	mg L <sup>-1</sup>	248	922	605	591 ± 337
N <sub>T</sub>	mg L <sup>-1</sup>	57,1	278,5	134,2	157 ± 112

Sendo: pH - potencial hidrogeniônico; T - temperatura; CE - condutividade elétrica; OD - oxigênio dissolvido; DQO - demanda química de oxigênio; DBO - demanda bioquímica de oxigênio; ST - sólidos totais; SVT - sólidos voláteis totais; SFT - sólidos fixos totais; SST - sólidos suspensos totais; SSV - sólidos suspensos voláteis; SSF - sólidos suspensos fixos; SP - sólidos sedimentáveis; CF - compostos fenólicos; Na<sub>T</sub> - sódio total; P<sub>T</sub> - fósforo total; K<sub>T</sub> - potássio total; N<sub>T</sub> - nitrogênio total; N.D.: não detectado.

A cascata foi composta de 23 degraus, com altura, largura e comprimento de 0,18; 0,32 e 0,60 m, respectivamente, perfazendo uma altura total de 4,14 m (Figura 1), tendo sido construída em concreto armado no traço 1:2:4 (cimento:areia:brita). Nas laterais da cascata, foram colocadas alvenaria em blocos de concreto, com altura, largura e comprimento de 0,18; 0,12 e 0,40 m, respectivamente, para evitar o escape lateral (perda) da ARC do sistema.

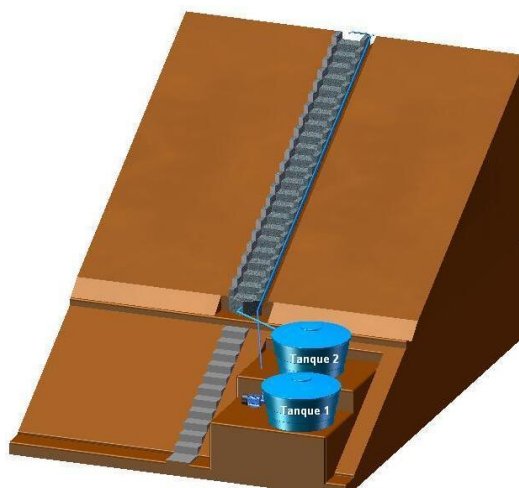


FIGURA 1. Esquema do sistema de tratamento por aeração em cascatas, com destaque para os tanques de recirculação (1), e recepção/detenção (2) da água residual do processamento dos frutos do cafeeiro. **Diagram of the aeration cascade system highlighting the recirculation (1) and receiving (2) tanks used to treat wastewater from coffee fruit processing (CW).**

No final da cascata, foi instalado um Tanque 2, denominado “tanque de recepção/detenção”, com capacidade volumétrica de  $2 \text{ m}^3$ , que recebia a ARC escoada na cascata. Na parte inferior desse tanque, foi instalada uma válvula de 40 mm, para controle da passagem da ARC do Tanque 2 para o Tanque 1, denominado “tanque de recirculação”, depois de decorrido um tempo de detenção de 3 horas. O tempo de detenção hidráulica (TDH) no tanque de recirculação foi considerado desprezível, tendo em vista que, assim que a ARC era totalmente transferida do tanque de recepção/armazenamento para ele, era bombeada para o topo da cascata, utilizando-se, para isso, de um conjunto motobomba com potência de 1 cv. A recirculação da ARC na cascata foi realizada 3 vezes ao dia, às 7; 10 e 13 h, sob vazão constante de  $1 \text{ L s}^{-1}$ , e a troca da água residuária foi feita 3 vezes durante o período de tempo de condução do experimento (de 18-05 a 16-06-2010). Ressalta-se que as recirculações da ARC efetuadas na cascata tiveram o intuito de simular o tratamento em cascatas com maior diferença de nível de queda.

Por cálculo da profundidade crítica da lâmina de ARC formada sobre os degraus, utilizou-se da [eq. (3)], apresentada por BAGATUR (2009):

$$h_c = (q^2/g)^{1/3} \quad (3)$$

em que,

$h_c$  é a profundidade crítica de escoamento (m);

$q$  é a taxa de aplicação da água ( $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ ), e

$g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m s}^{-2}$ ), tendo sido obtido o valor de  $6,58 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

Durante a fase de experimentação, foram coletadas amostras de ARC afluente (tanque de recirculação) e efluente (tanque de recepção/detenção), a cada troca da ARC. Nessas amostras, foram realizadas as análises de oxigênio dissolvido (OD) e demanda química de oxigênio (DQO), pelo método de oxidação química em refluxo aberto, em conformidade com recomendações do *Standard Methods for the Examination Water and Wastewater* (APHA, 2005), além de temperatura (T), por meio de termômetro de mercúrio. Em cada recirculação, foram coletadas amostras da escada a cada 1; 2; 3 e 4 m de desnível, bem como nos tanques de recepção/detenção e de recirculação, para avaliação da DQO, OD e T.

A concentração de OD foi monitorada no tanque de recepção/detenção (local de repouso do efluente da cascata), obtendo-se, assim, o modelo de seu decaimento com o tempo.

A eficiência de aeração ( $E_a$ ) na cascata foi obtida conforme apresentado na [eq. (2)], utilizando-se da média das concentrações afluentes ( $C_o$ ), efluentes ( $C_e$ ) e de saturação de oxigênio corrigida ( $C_s'$ ). Para cálculo de  $C_s'$ , foram utilizadas as eqs. (4) e (5), quando foi requerida sua estimativa em função da temperatura e da altitude (PÖPEL, 1979; QASIM, 1985, citados por VON SPERLING 2007) e a [eq. (6)] (BRASIL, 2005), quando essa estimativa foi feita considerando-se ou não o termo relativo ao efeito dos sais.

$$C_s = 14,652 - (4,1022 \times 10^{-1} \times T) + (7,9910 \times 10^{-3} \times T^2) - (7,7774 \times 10^{-5} \times T^3) \quad (4)$$

$$C_s' = C_s \times \left(1 - \frac{A}{9450}\right) \quad (5)$$

$$C_s' = (14,2 \times e^{-0,216 \times T} - 0,0016 \times C_{\text{sais}} \times e^{-0,0264 \times T}) \times (0,994 - 0,0001042 \times A) \quad (6)$$

em que,

T é a temperatura do líquido ( $^{\circ}\text{C}$ );

$C_s'$  é a concentração de saturação de oxigênio dissolvido com a altitude corrigida ( $\text{mg L}^{-1}$ );

A é a altitude (m), e

$C_{\text{sais}}$  é a concentração de sais ( $\text{mg L}^{-1}$ ) na ARC.

PAWLOWICZ (2008) recomendou, no entanto, que, quando a concentração de sais na água for estimada a partir de sua condutividade elétrica a uma temperatura qualquer ( $CE_T$ ), que seja feita, primeiramente, sua correção para a temperatura de  $25\text{ }^\circ\text{C}$  ( $CE_{25}$ ), conforme apresentado na [eq. (7)], corrigindo-se, antes, a condutividade elétrica na água residuária para  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , podendo ser, posteriormente estimada, utilizando-se da [eq. (8)]:

$$CE_{25} = \frac{CE_T}{(1 + 0,0191 \times (T - 25))} \quad (7)$$

$$C_{\text{sais}} = 0,65 \times CE_{25} \quad (8)$$

Para prover uma base uniforme para comparação de resultados medidos, GULLIVER et al. (1990), citados por BAYLAR et al. (2009), propuseram a utilização da [eq. (9)], com a qual se obtém um valor de eficiência de aeração corrigido para  $20\text{ }^\circ\text{C}$ :

$$1 - Ea_{20} = (1 - Ea_T)^{1/f} \quad (9)$$

em que,

$Ea_T$  é a eficiência de aeração na temperatura atual da água;

$Ea_{20}$  é a eficiência de aeração para a temperatura da água de  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , e

$f$  é um expoente descrito por:

$$f = 1.0 + 2,1 \times 10^{-2} \times (T - 20) + 8,26 \times 10^{-5} \times (T - 20)^2 \quad (10)$$

O experimento foi instalado seguindo-se um delineamento em blocos casualizados, esquema de parcelas subdivididas no tempo, consistindo em 3 blocos (3 períodos de coleta da ARC). No que se refere à variável DQO, foram avaliados 6 tratamentos principais (locais de coleta da ARC) e 10 tratamentos secundários (tempo de recirculação: 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8 e 9 dias), totalizando 180 unidades experimentais. As unidades experimentais foram constituídas pelas amostras coletadas em cada dia, nos pontos preestabelecidos.

Para estudar o decaimento da concentração de OD em função do tempo no tanque de recepção/detenção, um experimento à parte foi realizado em um delineamento inteiramente casualizado, com 6 repetições e 15 tratamentos (0; 2; 4; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 18; 20; 22; 24; 26 e 28 min). As unidades experimentais foram constituídas pelas alíquotas de ARC amostradas a cada 2 min.

Os dados foram submetidos à análise de variância por meio do teste F. As médias dos tratamentos principais foram comparadas pelo teste Duncan. O efeito dos tratamentos secundários (tempo) sobre a variável DQO foi estudado por meio de regressão. Na escolha do melhor modelo de regressão, adotaram-se os seguintes critérios: regressão significativa, ajuste não significativo e maior valor de coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificou-se aumento na concentração de OD na ARC em escoamento na cascata de aeração apenas em amostras obtidas na 1ª e 3ª coletas. Analisando-se os dados apresentados na Tabela 1, verifica-se que a 2ª. coleta de ARC foi a que apresentou maiores concentrações de DBO e DQO, além de maior CE; por essa razão, acredita-se que o oxigênio incorporado nessa água residuária tenha sido muito rapidamente consumido pelos microorganismos, a tal ponto de ter impossibilitado a percepção de alterações em sua concentração. Além disso, é possível que a maior CE (salinidade) da água residuária possa ter dificultado a manutenção do oxigênio incorporado no meio líquido,

uma vez que é um dos fatores que dificultam esse processo, tal como já reportado por RATHINAKUMAR et al. (2014).

Na 1ª e 3ª coletas de ARC, houve a incorporação média de 0,2 mg L<sup>-1</sup> de OD a cada 1 m de desnível na cascata, sendo que, a 4 m de desnível, foi possível a incorporação de até 1,8 mg L<sup>-1</sup>. No tanque de recepção/detenção, a permanência da ARC por 3 horas foi mais que suficiente para que, após o consumo pelos micro-organismos aeróbios, a concentração de OD voltasse a zero.

A eficiência de aeração ( $E_{20}$ ), calculada neste trabalho, utilizando-se dos dados gerados no escoamento da 1ª. e 3ª. coletas de ARC, foi de  $0,131 \pm 0,048$ , quando estimada utilizando-se das Equações 4 e 5 na estimativa de  $C_s'$ , e de  $0,128 \pm 0,048$  e  $0,141 \pm 0,048$ , quando se utilizou a Equação 6, respectivamente, desconsiderando-se o termo do efeito da concentração salina ou considerando-o, para estimativa de  $C_s'$ .

BAYLAR et al. (2009) encontraram, em cascatas de 0,15 m de altura, valores de  $E_{a20}$  de 0,55 e 0,80, para taxas de aplicação de 16,67 a  $100 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . MOULICK et al. (2010) obtiveram em cascata de 3,0 m de altura, com 14 degraus, sob taxa de aplicação de  $0,009 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  de água,  $E_a$  de 0,9. RATHINAKUMAR et al. (2014) obtiveram  $E_{a20}$  de 0,31 em água potável sem adição de sais e 0,34 em água potável em que eles foram adicionados, em cascatas de 1,8 m de altura, constituídas por 8 degraus de 0,225 m cada. Segundo esses autores, a presença de sais leva à redução nos processos difusivos do oxigênio no meio líquido, tendo em vista que os íons presentes atraem moléculas de água no fenômeno denominado "solvatação", diminuindo sua disponibilidade para atração de moléculas de oxigênio e os espaços para difusão desse gás. Tudo isso traz, como, consequência, diminuição na capacidade da retenção do oxigênio no meio líquido. Com base nisso, considera-se que a baixa capacidade da cascata em oxigenar a ARC possa estar, em grande parte, relacionada à baixa difusão e ao rápido consumo do oxigênio incorporado à massa líquida.

Dividindo-se  $E_a$  pela diferença de nível utilizada para cascadeamento da água, obtém-se um índice denominado de  $EH_{20}$ , cujo valor médio obtido foi de  $0,032 \text{ m}^{-1}$ , considerando-se as estimativas de  $C_s'$  obtidas, utilizando-se das Equações 4 e 5 na estimativa de  $C_s'$ , e de 0,031 e  $0,034 \text{ m}^{-1}$ , respectivamente, se forem utilizados valores de  $C_s'$  estimados, utilizando-se da Equação 6, desconsiderando-se ou considerando-se o termo relativo ao efeito salino. O valor de  $E_a$  dividido pelo número de degraus na cascata ( $E_{120}$ ) foi, em média, de 0,006, considerando-se ou não o efeito salino na estimativa do valor de  $C_s'$ . BAYLAR et al. (2009) obtiveram, em cascata com degraus de 0,15 m, na reaeração de água da rede de abastecimento público,  $EH_{20}$  de  $0,28 \text{ m}^{-1}$  a  $0,45 \text{ m}^{-1}$ . RATHINAKUMAR et al. (2014) obtiveram  $E_{120}$  de 0,039 e 0,043 e  $EH_{20}$   $0,172 \text{ m}^{-1}$  e  $0,189 \text{ m}^{-1}$  em água da rede de abastecimento que receberam e não receberam a adição de sais.

Na análise de regressão para o decaimento de OD em função do tempo no tanque de recepção/detenção, todos os modelos apresentados (linear, quadrático e cúbico) foram significativos, no entanto, não estão adequados para explicar o decaimento do oxigênio dissolvido no tanque de recepção/detenção. Desta forma, ajustou-se um modelo exponencial, estando a curva e a equação ajustada apresentadas na Figura 2.

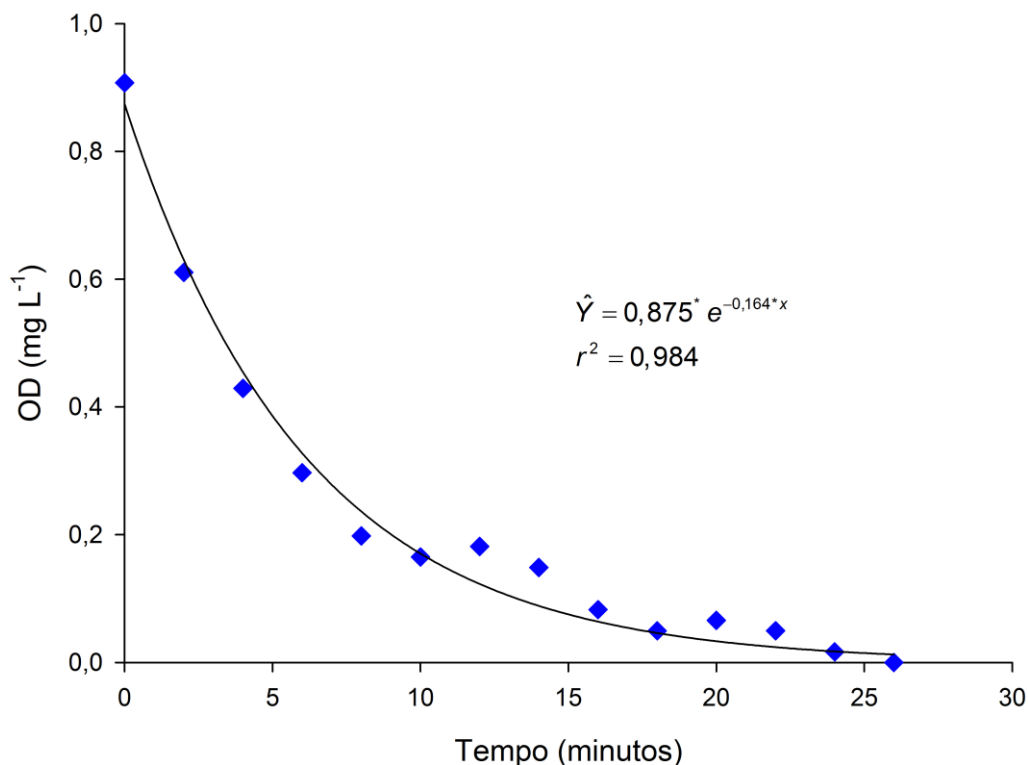


FIGURA 2. Decaimento médio de oxigênio dissolvido (OD) na água residuária do processamento dos frutos do cafeeiro contida no tanque de recepção/detenção, em função do tempo. **Average decay time for dissolution of oxygen (DO) in CW stored in the receiving tank.**

\* Significativo a 1% de significância

Conforme mostrado na Figura 2, a ARC apresentou o coeficiente de decaimento de OD de  $0,164 \text{ min}^{-1}$  no tanque de recepção/detenção. Esse alto decaimento de OD deveu-se ao rápido consumo por parte dos microorganismos aeróbios para degradação do material orgânico presente no meio e à perda de oxigênio da massa líquida para atmosfera.

O oxigênio incorporado na ARC, após seu escoamento na cascata de aeração, foi totalmente consumido em cerca de 26 min, e isso corrobora a discussão de que a detecção de baixas concentrações de OD em altas concentrações de material orgânico, quando escoadas em cascatas de aeração, se deve, também, ao fato da rapidez com que o oxigênio é consumido no meio. Embora, sob o ponto de vista do tratamento biológico, esse tempo seja muito curto, durante o escoamento na cascata de aeração, ele é muito longo, o que dificulta que mais oxigênio seja incorporado e difundido no meio. Assim, com base nos resultados obtidos, verificou-se a conveniência da presença de tanques de recepção/detenção entre lances de degraus na cascata de aeração, tendo em vista que a detenção da ARC nos tanques de recepção/detenção potencializa a incorporação de oxigênio na água residuária.

Na Figura 3, estão apresentadas a curva e a equação exponencial ajustada para descrever o decaimento da DQO na ARC com o tempo de sua recirculação na cascata de aeração.



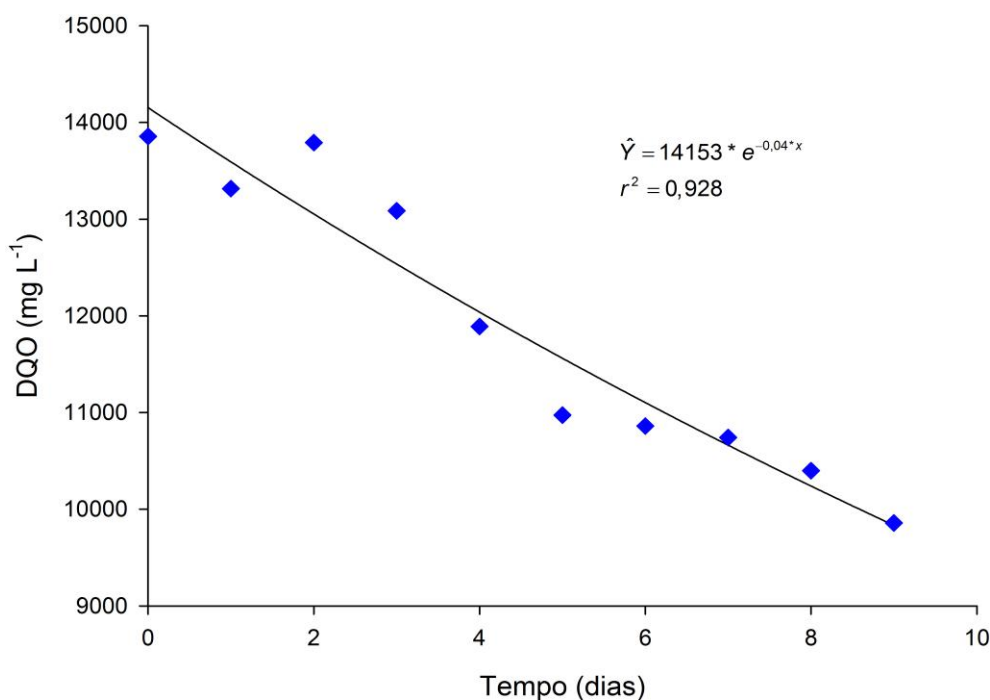


FIGURA 3. Decaimento da demanda química de oxigênio (DQO) na água residuária do processamento dos frutos do cafeeiro, em função do tempo de recirculação no sistema de aeração em cascata. **Average decay of chemical oxygen demand (COD) in coffee fruit processing wastewater as a function of recirculation time in cascade aeration system.**

\* Significativo a 1% de significância

Na Figura 3, observa-se que o aumento no tempo foi efetivo para que houvesse decréscimo na DQO da ARC, e o coeficiente de decaimento dessa variável foi de  $0,04 \text{ dia}^{-1}$ . Houve uma incorporação média de  $1,06 \text{ g}$  de OD a cada recirculação da ARC na cascata de aeração. No período de recirculação de cada coleta de ARC (10 dias), a eficiência média de remoção na DQO presente na ARC foi de  $28,9\%$ .

Embora, em relação à variável DQO, não se tenha conseguido atender aos padrões de lançamento da ARC, o que já era esperado, visto que a utilização apenas de cascatas de aeração não é suficiente para o tratamento de águas residuárias brutas, recomenda-se sua utilização após tratamento primário (decantação, filtro orgânico) ou primário/secundário (lagoas anaeróbias, filtros anaeróbios, reatores anaeróbios), podendo-se obter, inclusive, maior eficiência geral do sistema.

## CONCLUSÕES

A eficiência de aeração na cascata foi de ( $Ea_{20}$ ) de  $0,128$  a  $0,141$ , dependendo se no cálculo se considerou ou não o efeito salino na ARC.

A alta concentração de material orgânico não permitiu que se detectassem grandes alterações na concentração de oxigênio dissolvido na ARC; ainda assim, detectou-se a incorporação média de  $0,2 \text{ mg L}^{-1}$  de oxigênio a cada lance de  $1 \text{ m}$  de degraus na cascata.

A inclusão de tanques de recepção/detenção entre lances de degraus da cascata de aeração, visando à retenção da ARC por tempo superior a  $26 \text{ min}$ , deverá potencializar a incorporação de oxigênio nessa água residuária.

## REFERÊNCIAS

- APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AWWA - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WEF - WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21<sup>th</sup> ed. Washington: APHA/ AWWA/ WEF, 2005. 1268p.
- BAGATUR, T. Evaluation of preaeration with V-notch weir and cascade structures in clarifiers. **Journal of Environmental Engineering**, New York, v.135, p.176-184. 2009.
- BAYLAR, A.; EMIROGLU, M.E.; BAGATUR, T. Influence of chute slope on oxygen content in stepped waterways. **Gazy University Journal of Science**, Ankara, v.22, n.4, p.325-332, 2009.
- BAYLAR, A.; UNSAL, M.; OZKAN, F. The effect of flow patterns and energy dissipation over stepped chutes on aeration efficiency. **Journal of Civil Engineering**, Crows Nest, v.15, n.8, p.1329-1334, 2011.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais. **Sistema de cálculo da qualidade da água (SCQA). Estabelecimento das equações do índice de qualidade das águas (IQA)**. Brasília, 2005. 16p.
- FIA, R.; MATOS, A.T.; LAMBERT, T.F.; FIA, F.R.L.; MATOS, M.P. Tratamento das águas do processamento dos frutos do cafeeiro em filtro anaeróbio seguido por sistema alagado construído: II - Remoção de nutrientes e compostos fenólicos. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.30, n.6, p.1203-1213, 2010a.
- FIA, R., MATOS, A.T.; MATOS, M.P., ABREU, E.C., FIA, F.R.L. Tratamento das águas do processamento dos frutos do cafeeiro em filtro anaeróbio seguido por sistema alagado construído: I - Remoção de matéria orgânica. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.30, n.6, p.1191-1202, 2010b.
- KUMAR, A., MOULICK, S., SINGH, B.K., MAL, B.C. Design characteristics of pooled circular stepped cascade aeration system. **Aquacultural Engineering**, New York, v.56, p.51-58, 2013.
- MOULICK, S., TAMBADA, N.V., SINGH, B.K., MAL, B.C.J. Aeration characteristics of a rectangular stepped cascade system. **Water Science & Technology**, Oxford, v.61, n.2, p.415-420. 2010.
- OLIVEIRA, R.A.; BRUNO, N.M.N. 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, 2013
- PAWLOWICZ, R. Calculating the conductivity of natural waters. **Limnology and Oceanography**, Waco, v.6, p.489-501, 2008.
- RATHINAKUMAR, V.; DHINAKARAN, G.; SURIBABU, C.R. Assessment of Aeration Capacity of Stepped Cascade System for Selected Geometry. **International Journal of ChemTech Research**, Mumbai, v.6, n.1, p.254-262, 2014.
- RIBEIRO, M.S.; LIMA, L.A.; FARIA, F.H.S.; REZENDE, F.C.; FARIA, L.A. Efeitos de águas residuárias de café no crescimento vegetativo de cafeeiros em seu primeiro ano. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.29, n.4, p.569-577, 2009.
- VON SPERLING, M. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. Belo Horizonte: DESA/UFGM, 2007. 588p.
- ZAT, M.; BENETTI, A.D. Remoção dos compostos odoríferos geosmina e 2-metilisoborneol de águas de abastecimento através de processos de aeração em cascata, dessorção por ar e nanofiltração. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.16, n.4, p.353-360, 2011.