

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

Tratamiento de agua residual doméstica sin clarificación primaria en un sistema de lodos activados en la modalidad de estabilización por contacto

Domestic wastewater treatment
without primary clarification by contact
stabilization activated sludge process

Tatiana Mañunga*

Jenny A. Rodríguez-Victoria**

Patricia Torres-Lozada***

Universidad del Valle (Colombia)

* Ingeniera Sanitaria, Universidad del Valle (Colombia). M.Sc. y estudiante de Doctorado en Ingeniería, Universidad del Valle. *tati.anam@yahoo.com*.

** Ingeniera Sanitaria, Universidad del Valle (Colombia). Profesora Asociada, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle. M.Sc. y Dra. Universidad São Paulo, São Paulo, Brasil. *jenny.rodriguez@correounivalle.edu.co*.

*** Ingeniera Sanitaria, Universidad del Valle (Colombia). Profesora Titular, Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle. M.Sc. y Ph.D. Universidad São Paulo, São Paulo, Brasil. *patricia.torres@correounivalle.edu.co*.

Correspondencia: Tatiana Mañunga. Universidad del Valle sede Meléndez, Carrera 100 N°. 13-00, Edificio 336, Oficina 1020, Cali (Colombia). Tel.: (032) 321 2183.

Origen de subvenciones: el proyecto "Estudio preliminar del tratamiento secundario en un sistema de lodos activados bajo la modalidad de estabilización por contacto sin clarificación primaria" fue financiado por Empresas Municipales de Cali - EMCALI EICE ESP y la Universidad del Valle, registrado en la Universidad del Valle con código: CI 052538, durante el periodo octubre 27 de 2008 a diciembre 30 de 2009.

Resumen

El sistema de lodos activados en la modalidad de estabilización por contacto (SLAEC) es una tecnología de tipo biológico ampliamente utilizada para el tratamiento del agua residual, la cual generalmente es precedida por una clarificación primaria (CP). En este trabajo se evaluó el efecto de la eliminación de la CP sobre el desempeño de un SLAEC a escala piloto, para el tratamiento de agua residual doméstica, analizando el comportamiento de los sólidos suspendidos volátiles en el licor mixto (SSVLM), la concentración de DQO, DBO₅ y SST. Adicionalmente, el sistema fue operado con CP para comparar su desempeño con el observado cuando se eliminó la CP. Los resultados indicaron que la eliminación de la CP incrementó en un 44% la concentración de materia orgánica biodegradable afluente al sistema, y aumentó la vulnerabilidad del SLAEC sobre los efectos desfavorables que generan la presencia de grasas, aceites (G/A) y surfactantes en el agua residual, los cuales se tradujeron en la formación de una capa de lodo flotante en el sedimentador secundario, que afectó el desempeño de esta unidad y la calidad del lodo. No obstante, en las dos configuraciones evaluadas, el SLAEC alcanzó eficiencias de reducción de DQO, DBO₅ y SST superiores al 76%.

Palabras claves: *Agua residual doméstica, clarificación primaria, estabilización por contacto, lodos activados*

Abstract

The contact stabilization activated sludge process (CSASP) is amply applied in full scale plants treating domestic sewage, it is usually preceded by a primary clarifier. A pilot scale CSASP without and with primary clarification was evaluated to investigate the effect of primary clarification elimination on system performance. The system performance was monitored by measuring the MLVSS, COD, BOD and TSS. The results showed that elimination of primary clarification increased the biodegradable organic matter influent by 44% but fats, oils and surfactants entrance were observed. Fats and oils formed a floating sludge layer in the surface secondary clarifier that affect its performance and sludge quality. However, COD, BOD₅ and TSS removal efficiency was higher than 76% for in both CSASP without and with primary clarification.

Keywords: contact stabilization, primary clarification, sludge activated, wastewater

Fecha de recepción: 10 de abril de 2012
Fecha de aceptación: 23 de agosto de 2012

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de lodos activados es ampliamente utilizado para el tratamiento de agua residual doméstica. El modelo convencional está compuesto por un tanque de aireación y un sedimentador secundario (SS) [1]. En el tanque de aireación, donde se garantiza un suministro de oxígeno y una mezcla entre las agregaciones de microorganismos conocidos como “floc biológico” y el agua residual, la materia orgánica presente es degradada. Posteriormente, la mezcla de floc biológico y agua residual tratada conocida como “licor mixto” es separada en un SS [2].

Existen diferentes configuraciones desarrolladas a partir del modelo convencional, dentro de las cuales se encuentra la modalidad de “*Estabilización por contacto*”, que se destaca por su capacidad para reducir en un corto periodo los contaminantes del agua residual [1], [2]. La investigación realizada por Ullrich y Smith [3] impulsó el desarrollo de esta modalidad, que se caracteriza por la utilización de dos tanques de aireación (reactor de contacto -RC y reactor de estabilización - RE) separados por un SS. El RC tiene como función favorecer la rápida adsorción de la materia orgánica en el floc biológico.

La materia orgánica adsorbida en el floc biológico (previamente separado en el SS) es conducida al RE, donde ocurre su degradación por los microorganismos presentes en el floc biológico. En la figura 1 se presenta un esquema general de esta configuración.

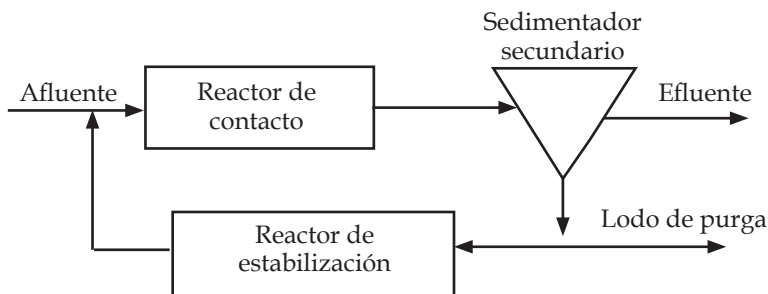


Figura 1. Esquema general del SLAEC

Los principales parámetros de operación del SLAEC están relacionados con el tiempo de retención celular (TRC), los SSVLM y la relación A/M. El TRC define el tipo de microorganismos que se establece en el sistema; valores entre 4 y 8 d favorecen la reducción de materia orgánica carbonacea [4], [5] principalmente a través de microorganismos heterótrofos [2], mientras que valores entre 6 y 10 d benefician la nitrificación [4], [6], dando lugar a la formación de microorganismos autótrofos [2]. Los SSVLM indican la biomasa activa en el sistema [7]; concentraciones entre 1.000 y 4.000 mg.L⁻¹ son sugeridas para el RC y entre 4.000 y 10.000 mg.L⁻¹ para el RE [2], [4]. La relación A/M representa la cantidad de sustrato disponible por unidad de microorganismos; su valor se encuentra relacionado con la tasa de utilización de sustrato, por lo que ha sido definida como un parámetro nutricional inversamente proporcional al TRC [4], [8]. Los valores típicos para el SLAEC varían entre 0.1 y 0.6 kgDBO₅.(kg SSVLM.d)⁻¹ [2], [9].

En un SLAEC, la proporción entre la biomasa presente en el RC frente a la biomasa total del sistema es definida a través del factor de distribución de lodos (Factor α); esta variable se puede relacionar con la capacidad de bio-adsorción del lodo y la calidad del efluente secundario. Valores entre 0.10 y 0.30 son recomendados para que en el SLAEC los procesos de adsorción y transformación de materia orgánica tengan lugar en el RC y RE respectivamente [10] - [12].

El tratamiento biológico del agua residual sucede, en gran medida, gracias a la capacidad que tiene el floc biológico para adsorber materia orgánica de tipo soluble y almacenar materia orgánica de tipo particulada; esta es una de las razones por las cuales el SLAEC podría ser operado sin una etapa previa de clarificación primaria [13] - [15].

Prescindir de la CP en el tratamiento del agua residual es una alternativa que ayuda a incrementar la carga orgánica afluente al sistema biológico. Puig et al. [16] mostraron a escala real que el incremento de la carga orgánica, que se produce por la ausencia de la CP, no deteriora la calidad del efluente. Por otro lado, Sarioglu et al. [10] sugieren que la eficiencia del SLAEC se incrementa en la medida que aumenta la fracción de materia orgánica particulada en el agua residual, por lo que eliminar la CP podría ser particularmente útil cuando el agua residual presenta bajas concentraciones de materia orgánica.

Los sistemas de tratamiento de agua residual doméstica que puedan eliminar la CP, resultan interesantes para ciudades y municipios intermedios, donde la disponibilidad de área para el tratamiento del agua residual puede ser una condición limitante en la selección de tecnología. Adicionalmente, eliminar la CP puede beneficiar la relación costo/eficiencia del tratamiento del agua residual. En este trabajo se evaluó y comparó el desempeño de un SLAEC, con y sin CP, en el tratamiento del agua residual doméstica bajo similares condiciones operacionales, con el objetivo de identificar el efecto que puede tener sobre la operación, desempeño y calidad del lodo, la eliminación de la clarificación primaria.

2. METODOLOGÍA

Para el estudio se utilizó un sistema a escala piloto, con un caudal promedio de 0.72 L.s^{-1} . Los volúmenes útiles del CP, RC, RE y SS fueron 3.60 m^3 , 2.19 m^3 , 4.53 m^3 y 5.43 m^3 , respectivamente.

La investigación se dividió en dos etapas: en la primera, el SLAEC fue operado sin clarificación primaria (etapa sin CP), es decir que agua residual desarenada ingresó directamente al RC. En la segunda etapa se incluyó la clarificación primaria (etapa con CP). Un esquema de la configuración del sistema en cada etapa se presenta en la figura 2.

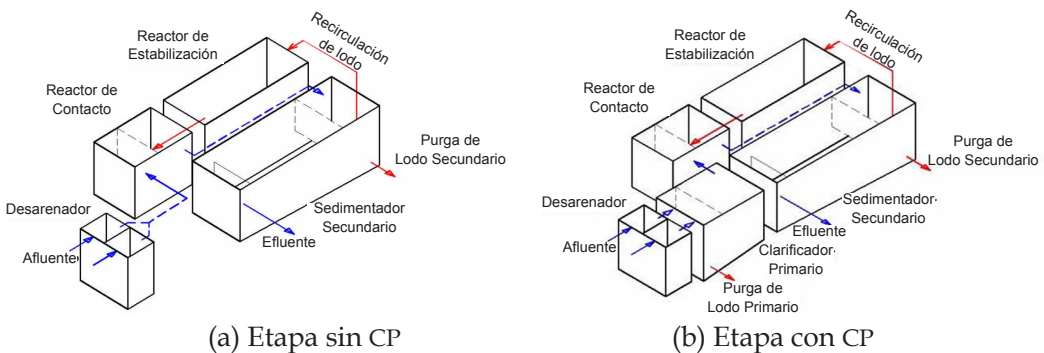


Figura 2. Configuración del sistema SLAEC en cada etapa de evaluación

Para la alimentación del sistema, se empleó agua residual doméstica afluyente a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Ciudad de Cali (Colombia) (PTAR Cañaveralejo – PTAR-C). Previo al ingreso a la planta piloto, el agua residual pasó a través de un tratamiento preliminar

constituido por rejillas gruesas, rejillas finas y desarenador. Las características fisicoquímicas del agua residual se presentan en la tabla 1.

Tabla 1
Características del agua residual afluyente

Variable	Agua Residual		Efluente Primario	
	Etapa sin CP		Etapa con CP	
	Valor	No. Datos	Valor	No. Datos
Demanda química de oxígeno - DQO (mg.L ⁻¹)	251 ± 98	37	208 ± 73	27
Demanda bioquímica de oxígeno - DBO ₅ (mg.L ⁻¹)	192 ± 16	16	108 ± 42	15
Sólidos suspendidos totales - SST (mg.L ⁻¹)	99 ± 37	37	80 ± 17	27

El sistema fue operado en flujo continuo durante 114 d en la etapa sin CP y durante 66 d en la etapa con CP; las condiciones operacionales para las dos etapas fueron seleccionadas teniendo en cuenta los resultados de Vásquez et al. [17], quienes establecieron que para este tipo de agua residual, el mejor desempeño del SLAEC en términos de la eficiencia de reducción de DQO, DBO₅ y SST se obtiene con: *TRC 6.0 d, caudal de recirculación de lodos 0.29 L.s⁻¹ (Recirculación: 40%), tiempo de retención hidráulico (TRH) en RC 0.84 h, TRH en RE 4.11 h, TRH en el SS 2.09 h, oxígeno disuelto (OD) en el RC y RE de 2.5 mg O₂.L⁻¹*. En la etapa con CP, el TRH en el CP fue 1.39 h.

Para analizar el desempeño de los sistemas, se recolectaron muestras puntuales de agua residual en el afluyente y efluente. En la etapa sin CP, el afluyente al sistema fue agua residual desarenada, mientras que en la etapa con CP, lo fue el efluente del clarificador primario. Así mismo, se tomaron muestras del licor mixto presente en el RC y RE.

Se realizaron análisis de DQO, DBO₅ y SST en el afluyente y efluente. En el licor mixto se determinó la concentración de SSV. Todos los análisis fueron realizados de acuerdo con las recomendaciones de los Métodos Standard [18].

El desempeño de los sistemas se comparó estadísticamente a través del TRC, SSVLM en el RC y RE, relación A/M y Factor α . Con estas variables se aplicó

una prueba t de 2 muestras de comparación de medias; las diferencias observadas fueron consideradas estadísticamente significativas en un intervalo de confianza del 95% ($p < 0.05$). Adicionalmente, la eficiencia del sistema fue analizada a través de la reducción de DQO, DBO₅ y SST. Para el análisis estadístico se utilizó el *software* MINITAB 16 ® (versión de prueba).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características del agua residual

De acuerdo con la información contenida en la tabla 1, la composición del agua residual afluyente al sistema biológico en la etapa sin CP correspondió a un agua residual entre débil y media concentración, según la clasificación propuesta por Tchobanoglous et al. [11]. En la etapa con CP, las concentraciones de DQO, DBO₅ y SST disminuyeron con la inclusión de la CP, por lo que el afluyente al RC presentó características semejantes a un agua residual de débil concentración.

Al comparar los valores promedio de DQO, DBO₅ y SST de las dos modalidades de operación del SLAEC, se observa que la ausencia de la CP incrementó su concentración en porcentajes cercanos al 17%, 44% y 19% respectivamente, lo que denota que el principal aporte de la ausencia de la CP fue el incremento de la materia orgánica biodegradable en el afluyente al RC. Un resultado similar fue esperado por Puig et al. [16], quienes plantearon el *by-pass* del clarificador primario como estrategia para incrementar la carga orgánica biodegradable en un sistema de tratamiento para la reducción de nutrientes.

Evaluación de las variables operacionales

El TRC, la biomasa determinada a través de los SSVLM y la relación A/M son las principales variables operacionales relacionadas con el desempeño del SLAEC, así como el Factor α que define la relación entre los SSVLM del RC y SSVLM del RE. El comportamiento de estas variables operacionales se presenta en la tabla 2 y en la figura 3.

Tabla 2
 Variables operacionales

Variable	Agua Residual		Efluente Primario	
	Etapa sin CP		Etapa con CP	
	Promedio	No. Datos	Promedio	No. Datos
TRC (d)	6.0 ± 2.2	34	5.3 ± 1.1	27
SSVLM RC (mg.L^{-1})	1277 ± 401	37	1284 ± 323	27
SSVLM RE (mg.L^{-1})	2819 ± 780	37	3500 ± 1075	27
Relación A/M ($\text{kgDBO}_5.(\text{kgSSVLM.d})^{-1}$)	0.7 ± 0.33	37	0.4 ± 0.24	27
Factor α	0.18 ± 0.06	37	0.16 ± 0.04	27

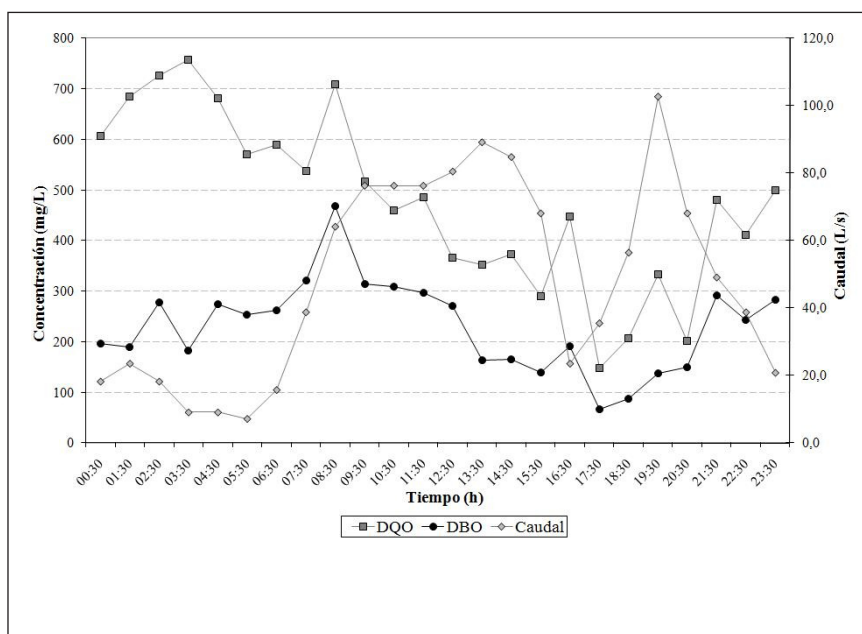


Figura 3. Comportamiento de las variables operacionales

Tiempo de retención celular (TRC)

El control del TRC, a través de la purga diaria de lodo desde el SS, resultó en un valor promedio de 6.0 d en la etapa sin CP y 5.3 d en la etapa con CP. Estadísticamente, no se observaron diferencias significativas entre estos

valores ($p>0.05$); la similitud en el comportamiento de esta variable sugiere que los procesos de transformación de materia orgánica se realizaron en ambientes similares, ya que el TRC define ampliamente la ecología del sistema.

Desde una perspectiva bioquímica, autores como Grady et al. [4] indican que en sistemas aerobios con TRC entre 2 y 6 d se promueve principalmente la reducción de materia orgánica (soluble y particulada) y procesos de floculación, por lo que se argumenta que en los sistemas evaluados se fomentaron las condiciones necesarias para reducir principalmente materia orgánica carbonacea.

Sólidos suspendidos volátiles en el licor mixto (SSVLM)

Las concentraciones promedio de SSVLM en el RC y RE durante la etapa sin CP fueron 1277 y 2819 mg.L^{-1} , respectivamente; mientras que en la etapa con CP fueron 1284 y 3500 mg.L^{-1} , respectivamente. En los dos casos los valores se acercaron a los mínimos recomendados por Ramalho et al. [1] y Rittman y McCarty [2] para esta modalidad de lodos activados. Estadísticamente, no se observaron diferencias significativas ($p>0.05$) entre la concentración promedio de SSVLM en el RC de la etapa sin CP y etapa con CP, lo cual indicó que la cantidad de biomasa activa disponible para los procesos de adsorción y almacenamiento que tienen lugar en este reactor fue similar en las dos etapas evaluadas.

Durante la etapa sin CP, la capacidad de adsorción del floc biológico probablemente fue usada en mayor proporción, ya que la ausencia de la CP incrementó la cantidad de sustrato biodegradable; sin embargo, no fue necesaria una mayor cantidad de biomasa para absorber la sobrecarga orgánica comparada con la etapa con CP.

Con respecto a la concentración de SSVLM en el RE, se observaron diferencias significativas entre la etapa sin CP y la etapa con CP ($p<0.05$), las cuales fueron atribuidas a los procesos de compactación y adensamiento del lodo que tienen lugar en el SS, una vez que la eficiencia de estos procesos define la concentración de SSVLM en el lodo recirculado hacia el RE [6]. Con la inclusión de la CP la concentración de SSVLM en el RE se incrementó en un porcentaje igual al 19%. Este comportamiento contradice lo reportado

por Wilén et al. [19], quienes señalan que eliminar la CP incrementa la concentración de SSVLM en el RE como resultado de la presencia de sólidos sedimentables, que en ausencia de la CP hacen parte del licor mixto que es conducido hasta el SS.

Una desventaja de eliminar la CP, tal como lo señala Hernández [20], es la pérdida de una barrera de control. Ullrich y Smith [21] advierten que eliminar la CP incrementa el ingreso de G/A y surfactantes que pueden alterar los procesos de compactación y adensamiento del lodo. Para el sistema evaluado, la eliminación de la CP pudo representar una pérdida de la barrera de control sobre la calidad del agua residual afluyente al RC, favoreciendo la presencia de G/A y surfactantes que afectó la compactación del lodo en el SS, lo cual fue confirmado a través de la disminución en la concentración de SSVLM en el lodo recirculado hacia el RE.

Relación A/M

La relación A/M presentó en la etapa sin CP y con CP valores promedio de $0.7 \text{ kg DBO}_5 \cdot (\text{kg SSVLM} \cdot \text{d})^{-1}$ y $0.4 \text{ kg DBO}_5 \cdot (\text{kg SSVLM} \cdot \text{d})^{-1}$, respectivamente. Los valores reportados fueron superiores al mínimo ($0.2 \text{ kg DBO}_5 \cdot (\text{kg SSVLM} \cdot \text{d})^{-1}$) sugerido por [2], [8] y [9] para evitar condiciones de limitación de sustrato. La ausencia de la CP incrementó en un 57% la cantidad de materia orgánica aplicada al sistema, comparada con la aplicada en la etapa con CP donde ocurre la decantación de partículas en el clarificador primario que produce una disminución de la materia orgánica biodegradable afluyente al RC.

Aunque Mendoza [22] sugiere que para evitar el crecimiento de microorganismos filamentosos el valor de la relación A/M no debe sobrepasar $0.6 \text{ kg DBO}_5 \cdot (\text{kg SSVLM} \cdot \text{d})^{-1}$, el desempeño del sistema no fue alterado con una relación A/M de $0.7 \text{ kg DBO}_5 \cdot (\text{kg SSVLM} \cdot \text{d})^{-1}$.

Por otro lado, Vásquez et al. [17] sugieren que valores hasta de $0.89 \text{ kg DBO}_5 \cdot (\text{kg SSVLM} \cdot \text{d})^{-1}$ permiten un mejor uso de la capacidad de bioadsorción del floc biológico en el SLAEC, por lo que se considera que la relación A/M que fue promovida en el sistema durante la etapa sin CP, probablemente permitió una mayor disponibilidad de materia orgánica para el proceso de adsorción en el RC, es decir que eliminar la CP condujo a un mejor

aprovechamiento de la capacidad de adsorción sin generar condiciones de exceso de sustrato.

Factor α

El Factor α presentó un valor promedio de 0.18 y 0.16 en la etapa sin CP y con CP, respectivamente; no se observaron diferencias significativas entre estos valores ($p > 0.05$), lo que sugiere que la distribución de sólidos en el sistema no dependió de las características del agua residual. Un resultado similar fue descrito por Vásquez et al. [17], quienes reportaron que un valor de α entre 0.1 y 0.20 es suficiente para asegurar un buen desempeño.

Por otro lado, esta distribución de sólidos promovió la separación física de los mecanismos de transformación y aprovechamiento de la materia orgánica; una menor concentración de SSVLM en el RC favoreció la adsorción física de materia orgánica y, por el contrario, en el RE una mayor concentración de SSVLM fomentó el aprovechamiento y degradación del sustrato. De acuerdo con Sarioglu et al. [10], este comportamiento es el esperado en un SLAEC. Adicionalmente, concentrar la mayor parte de la biomasa en el RE permite recuperar rápidamente la estabilidad del sistema cuando suceden eventos que afectan su desempeño. Esta condición fue particularmente favorable en la etapa sin CP, durante la cual se incrementó la presencia de G/A y surfactantes en el agua residual afluyente al RC, los cuales afectan negativamente la ecología del sistema, y traen como consecuencia la ineficiencia del tratamiento.

Reducción de carga orgánica

La evaluación del desempeño a través del seguimiento de la reducción de carga orgánica mostró que eliminar la CP no generó diferencias significativas en la eficiencia de los sistemas, tal como se ilustra en la figura 4.

En la etapa sin CP, se alcanzaron eficiencias en la reducción de carga de DQO, DBO₅ y SST del 78%, 80% y 80% respectivamente, las cuales son comparables con otros sistemas sin CP como los descritos por Puig et al. [16] y Bolzonella et al. [23]. En la etapa con CP, las eficiencias fueron del 76%, 80% y 80% respectivamente, resultados similares a los descritos por Vásquez et al. [17] para un SLAEC con CP.

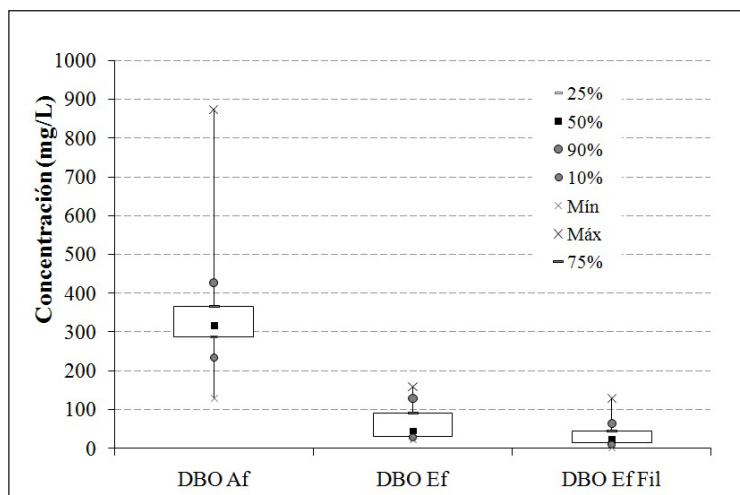


Figura 4. Reducción de la carga

Durante la etapa sin CP, el incremento de la cantidad de materia orgánica biodegradable fue adsorbido y transformado eficientemente por el sistema, y el material no biodegradable fue retirado a través del lodo de purga en el SS. Estas afirmaciones se sustentan a través de la calidad del efluente secundario, el cual en los dos casos (con y sin CP) presentó valores de concentraciones de DQO, DBO_5 y SST inferiores a 40 mg.L^{-1} , 35 mg.L^{-1} y 20 mg.L^{-1} respectivamente. Un resultado similar fue descrito por Puig et al. [16], quienes afirman que eliminar la CP no deteriora la calidad del efluente ni altera las eficiencias de reducción de nutrientes.

4. CONCLUSIONES

Las eficiencias alcanzadas en la reducción de carga de DQO, DBO_5 y SST (76, 80 y 80% respectivamente) en las etapas con y sin CP no presentaron diferencias significativas, lo cual indica que la eliminación de la CP no tiene efecto sobre el desempeño del sistema en términos de eliminación de carga contaminante.

La pérdida de una barrera de control sobre la calidad del agua residual afluente al RC durante la etapa sin CP, pudo ser parcialmente asumida por el sistema gracias a la distribución de sólidos (Factor α : 0.18 ± 0.06); sin embargo, debe tenerse precaución con la presencia de G/A y surfactantes

en el agua residual afluyente, ya que se observó un deterioro en el desempeño del SS, traducido en flotación de lodo. Los efectos adversos observados permitieron comprobar los beneficios que ofrece la CP, no medibles a través de las eficiencias de eliminación de contaminantes, y que están relacionados con el efecto amortiguador que ejerce esta unidad ante las variaciones en la composición y concentración del agua residual.

Lo anterior permite concluir que es factible eliminar la CP en busca de un beneficio a favor del costo global de tratamiento; sin embargo, se hace hincapié en la necesidad de garantizar un tratamiento preliminar eficaz en la retención de sólidos de gran tamaño y controlar las descargas de G/A y surfactantes, ya que estos contaminantes desestabilizan el desempeño del sistema biológico en ausencia de la CP.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad del Valle y a EMCALI EICE ESP por el apoyo prestado para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] R. S. Ramalho, D. J. Beltrán y F. L. Soria, *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona (España): Reverté, 1996, pp. 419-425.
- [2] B. E. Rittman y P. L. McCarty, *Biotecnología del medio ambiente: Principios y aplicaciones*. Madrid (España): McGraw-Hill, 2001, pp. 299-370.
- [3] A. H. Ullrich and M. W. Smith, "The biosorption process of sewage and waste treatment," *Sewage and Industrial Wastes*, vol. 23, no. 10, pp. 1248-1253, 1951.
- [4] C. P. Grady, G. T. Daigger, and H. C. Lim, *Biological wastewater treatment*. New York: Marcel Dekker, 1999, pp. 377-481.
- [5] S. Liu, B. Ni, L. Wei, Y. Tang, and H. Yu, "Contact-adsorption-regeneration-stabilization process for the treatment of municipal wastewater," *Journal of Water and Environment Technology*, vol. 7, pp. 83-90, 2009.
- [6] A. C. van Haandel e G. Marais, *O comportamento do sistema de lodo ativado: teoria e aplicações para projetos e operação*. Campina Grande - PB (Brazil): EPGRAF, 1999, pp. 125-260.
- [7] M. von Sperling, "Princípios básicos do tratamento de esgotos," en *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*, vol. 2. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1996, pp. 105-136.

- [8] F. Sanin, A. Vatansever, I. Turtin, F. Kara, B. Durmaz, and M. Sesay, "Operational conditions of activated sludge: Influence on flocculation and dewaterability," *Drying Technology*, vol. 24, pp. 1297-1306, 2006.
- [9] L. D. Benefield and C. W. Randall, *Biological process design for wastewater treatment, Series in Environmental Sciences, Spectrum Book*. USA: Prentice Hall, 1981, pp. 140-365.
- [10] M. Sarioglu, D. Orhon, E. Görgün, and N. Artan, "Design procedure for carbon removal in contact stabilization activated sludge process," *Water Science and Technology*, vol. 48, pp. 285-292, 2003.
- [11] G. Tchobanoglous, F. L. Burton, H. D. Stensel, and Metcalf & Eddy®, *Wastewater engineering: treatment and reuse*, 4^a ed. New York: McGraw-Hill, 2003, pp. 425 – 680.
- [12] W. V. Alexander, G. A. Ekama, and G. R. Marais, "The activated sludge process part 2. application of the general kinetic model to the contact stabilization process," *Water Research*, vol. 14, 1980.
- [13] J. R. Schultz, B. A. Hegg, and K. L. Rakness, "Realistic sludge production for activated sludge plants without primary clarifiers," *Journal (Water Pollution Control Federation)*, vol. 54, no. 10, pp. 1355-1360, 1982.
- [14] J. Chudoba and F. Tucek, "Production, degradation, and composition of activated sludge in aeration systems without primary sedimentation," *Journal (Water Pollution Control Federation)*, vol 57, no. 3, pp. 201-206, 1985.
- [15] A. Guellil, F. Thomas, J. C. Block, J. L. Bersillon, and P. Ginestet, "Transfer of organic matter between wastewater and activated sludge flocs," *Water Research*, vol. 35, pp. 143-150, 2001.
- [16] S. Puig, M. van Loosdrecht, A. Flameling, J. Colprim, and S. Meijer, "The effect of primary sedimentation on full-scale WWTP nutrient removal performance," *Water Research*, vol. 44, pp. 3375-3384, 2010.
- [17] N. Vásquez, J. A. Rodríguez, P. Torres, and C. A. Madera "Performance of contact stabilization process for domestic wastewater treatment of Cali, Colombia," *Dyna*, vol. 168, pp. 98-107, 2011.
- [18] APHA, AWWA and WEF, *The Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21th ed. Washington DC: American Public Health Association, 2005, pp. 2-55, 5-14.
- [19] B. Wilén, D. Lumley, A. Mattsson, and T. Mino, "Relationship between floc composition and flocculation and settling properties studied at a full scale activated sludge plant," *Water Research*, vol. 42, pp. 4404-4418, 2008.
- [20] A. Hernández, *Depuración y desinfección de aguas residuales*. Madrid (España): Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos., 1992, pp. 135 - 180
- [21] A. H. Ullrich and M. W. Smith, "Operation experience with activated sludge: biosorption at Austin, Texas," *Sewage and Industrial Wastes*, vol. 29, pp. 400-413, 1957.

- [22] S. R. Mendonça, *Sistema de lagunas de estabilización*. Bogotá (Colombia): McGraw-Hill, 1999, pp. 145-148.
- [23] D. Bolzonella, P. Pavan, P. Battistoni, and F. Cecchi, "Mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge: influence of the solid retention time in the wastewater treatment process," *Process Biochemistry*, vol. 40, pp. 1453-1460, 2005.