



DESTINO DE FÁRMACOS NEUTROS EN LA ESTABILIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES

Ramírez Camperos Mercedes Esperanza¹, Cardoso Vigueros Lina², Galindo Montaña Jonathan³, Raudry Ramírez Brenda⁴, De la Cruz Pinzón Aristeo⁵, Tobías Estrada Miriam Rebeca⁶, Hernández García Paola⁷, Miranda Saturnino Miyamin J⁸, Calderón Mólgora César G.⁹

^{1,2,8,9} Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532. Progreso, Jiutepec, Mor. C.P. 62550. (777)329.36.22. ³ Universidad Politécnica del Estado de Morelos, ⁴ Instituto Tecnológico de Durango, ⁵ Instituto Tecnológico de la Montaña, Tlapa de Comonfort, Guerrero, ⁶ Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, ⁷ Universidad Politécnica de Chiapas.

¹eramirez@tlaloc.imta.mx, ²lina_cardoso@tlaloc.imta.mx, ³jonazzgalindo@gmail.com, ⁴brenda.li@hotmail, ⁵alis_teo@hotmail.com, ⁶becca_tobias@hotmail.com, ⁷pa.hola_95@hotmail.com, ⁸mencmiyamin@gmail.com, ⁹calderon@tlaloc.imta.mx

RESUMEN

Se realizó la estabilización de lodos primario y secundario de una planta de tratamiento de aguas municipales por medio de los procesos de estabilización anaerobia, aerobia y anóxica. Se dió seguimiento a la presencia de tres fármacos neutros comúnmente utilizados entre la población. Fluoxetina (antidepresivo); metoprolol (hipertensivo y para el ataque agudo de miocardio), y ácido mefenámico (antiinflamatorio). La concentración de los compuestos en el lodo sin estabilizar fueron las siguientes: Fluoxetina se detectó en un intervalo de 3 a <0.5 µg/kg; metoprolol de 10.35 a <0.5 µg/kg; ácido mefenámico de 165 a <0.4 µg/kg. Durante la estabilización anaerobia la fluoxetina presentó remoción parcial hasta 90% en algunos de los experimentos, pero también se observa en otros, una tendencia a acumularse. La estabilización aerobia presentó una remoción de 84% de fluoxetina y 52% de ácido mefenámico. La estabilización anóxica con densidad de flujo magnético de 1.5 mT, obtuvo una remoción de 86% de fluoxetina y 24% de ácido mefenámico. En general, los procesos de estabilización anaerobia, aerobia y anóxica removieron parcialmente los fármacos en estudio. Con los resultados obtenidos no se pudo establecer una correlación entre los parámetros de control de los procesos y la remoción de estos compuestos.

Palabras clave: Anaerobio, aerobio, anóxico, estabilización de lodos residuales, fármacos.

INTRODUCCIÓN

El lodo residual generado en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTARM) se estabiliza generalmente por procesos anaerobios y aerobios. Cumpliendo con la norma mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, se puede utilizar para su aplicación como mejorador de suelos o disponer en rellenos sanitarios. Esta norma regula contaminantes tóxicos como metales pesados y patógenos. Sin embargo, en el lodo pueden encontrarse otros compuestos tóxicos que afecten al suelo, los cultivos y a la salud humana, y que se encuentran en muy bajas concentraciones como son los contaminantes prioritarios y los compuestos emergentes (Mailler *et al.*, 2014). La contaminación de lodos de PTARM por microcontaminantes se reporta desde hace varios años. Es resultado de la sorción

durante el tratamiento primario y secundario del agua residual, debido a la hidrofobicidad y tendencia a la adsorción de estos compuestos sobre las partículas sólidas. Como es muy fuerte la tendencia de aplicarlos en el suelo, estos contaminantes representan un grave peligro considerando su acumulación en el lodo y posterior transferencia al ambiente. Ejemplos de estos compuestos son: los difenilos policlorados (PCBs), los hidrocarburos poliaromáticos, pesticidas y diferentes tipos de sustancias orgánicas tóxicas e inorgánicas (Semblante *et al.*, 2015; Stamatelatos, K *et al.*, 2011). A pesar de numerosas investigaciones realizadas falta conocimiento de la calidad de los lodos tratados y de la eficiencia de los procesos de tratamiento para la remoción de contaminantes y los mecanismos involucrados.

El objetivo de este trabajo fue conocer el destino de tres fármacos neutros comúnmente utilizados por la población para el control de enfermedades. Fluoxetina (antidepresivo); metoprolol (hipertensión y ataque agudo de miocardio), y ácido mefenámico (antiinflamatorio). Estos fármacos reportan baja biodegradabilidad en los procesos convencionales de tratamiento de agua residual. La fluoxetina y el ácido mefenámico tienen gran capacidad de adsorberse a las partículas sólidas por sus altos coeficientes de partición octanol- agua (log Kow 4.7 y log Kow 5.4, respectivamente). El metoprolol presenta un bajo coeficiente log Kow 1.7-1.88 por lo tanto puede estar en mayores concentraciones en la fase líquida. (Flores Velazquez y Mijaylova Nacheva, 2017, Luo *et al.*, 2014). Para determinar el potencial de los procesos convencionales de estabilización de lodo residual en el control de microcontaminantes se dió seguimiento a los mismos durante la estabilización anaerobia mesofílica, la estabilización aerobia y la anóxica, midiendo su concentración en el lodo crudo y después de su tratamiento; así también a los parámetros más importantes que controlaban los diferentes procesos.

METODOLOGÍA

Para la realización del estudio se tomaron muestras de los lodos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales. Se hicieron mezclas de lodo primario y de lodo secundario después del espesamiento. Con esta mezcla se alimentaron diferentes módulos experimentales de

“Norteamérica y el Caribe en el camino hacia el desarrollo sostenible”

estabilización de lodos. El módulo de estabilización anaerobia operó durante 15 meses con diferentes fases experimentales las cuales se diferencian principalmente por las características del lodo utilizado en cada etapa y la carga sobre los reactores. Se utilizaron cuatro reactores con un volumen efectivo de 2 litros, que operaron a temperatura mesofílica (32-35°C) en régimen discontinuo y completamente mezclado. Los reactores operaron con cargas entre 0.37 y 1.62 kg SSV/m³ d. La tabla 1 muestra las condiciones de operación de las etapas experimentales. El reactor R1 recibió un pretratamiento de inducción magnética que consistió en poner en contacto la mezcla de lodo con una densidad de flujo magnético de 0.5 T durante 1 hora. La cuantificación del biogás se realizó mediante la prueba de desplazamiento. El biogás generado por los reactores se capturó en bolsas Tedlar® con válvula de polipropileno, para su posterior análisis en el cromatógrafo de gases.

Para la evaluación de la estabilización aerobia y anóxica, se instalaron cuatro reactores que operaron en régimen discontinuo con un volumen de operación de 10 L de lodo. Cada reactor contó con un sistema de aeración y/o agitación, para alcanzar concentraciones de oxígeno disuelto (OD) de <1, 2 y 5 mg/L. Se instalaron dos reactores anóxicos (OD <1 mg/L), uno operó con una densidad de flujo magnético promedio de 1.5 mT.

Parámetros para el control y análisis. Los fármacos se identificaron y cuantificaron realizando una extracción en fase sólida y derivatización con N,O,Bis(trimethylsilyl)trifluoroacetamide con trimethylchlorosilane al 1% y relacionado con piridina. (Flores *et al.*, 2015) Los extractos obtenidos se reconstituyeron e inyectaron a un cromatógrafo de gases, acoplado a espectrómetro de masas de triple cuadrupolo, modelo: GCMS-TQ8040 y AOC-20i, marca Shimadzu. Técnica utilizada CAQA06-18, laboratorio de Calidad del Agua del IMTA, adaptada y modificada de Sacher *et al.*, 2001. El análisis del biogás y la cuantificación de metano se realizaron en el cromatógrafo de gases SRI Instruments, modelo 8610 C. Los parámetros pH, T, OD, Nitrógeno Total (NT), Nitratos (NO₃), Nitritos (NO₂), Nitrógeno Amoniacal (N-NH₄), Fósforo Total (PT), ácidos grasos volátiles y DQO se analizaron de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas y los Standard Methods (APHA,2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estabilización anaerobia

Los resultados promedio obtenidos en las diferentes etapas de la estabilización anaerobia se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Condiciones experimentales y resultados promedio en la estabilización anaerobia

Condiciones de operación				
Temperatura de operación	32-35 °C (rango mesofílico)			
Estabilización	R1	R2	R3	R4
Tiempo de retención de sólidos (d)	20	20	15	30

Cargas de aplicación (kg SSV/ m ³ d)	1.21	1.21	1.62	0.81
Destrucción de sólidos volátiles (%)	14.3	9.38	14.6	13.1
Producción de biogás (mL/min)	3.34	3.09	2.81	3.51
Gas metano (%)	47	18	51	42
Primera etapa	R1	R2	R3	R4
Tiempo de retención de sólidos (d)	20	20	15	30
Cargas de aplicación (kg SSV/ m ³ d)	1.12	1.17	1.54	0.84
Destrucción de sólidos volátiles (%)	36.7	27.66	28.2	23.9
Producción de biogás (mL/min)	3.13	3.66	3.03	2.84
Gas metano (%)	39.7	37.97	37.5	36.9
Segunda etapa	R1	R2	R3	R4
Tiempo de retención de sólidos (d)	20	20	15	30
Cargas de aplicación (kg SSV/ m ³ d)	1.29	1.36	1.79	0.89
Destrucción de sólidos volátiles (%)	32	28	29.2	29.8
Producción de biogás (mL/min)	4.1	5.8	3.26	3.4
Gas Metano (%)	39	40.1	40.9	38
Tercera etapa	R1	R2	R3	R4
Tiempo de retención de sólidos (d)	20	20	15	30
Cargas de aplicación (kg SSV/ m ³ d)	0.59	0.63	0.67	0.37
Destrucción de sólidos volátiles (%)	52.8	25.85	38.7	48.8
Producción de biogás (mL/min)	5.52	5.11	5.68	5.6
Gas metano (%)	68.0	61.37	68.7	65.4
Cuarta etapa	R1	R2	R3	R4
Tiempo de retención de sólidos (d)	20	20	20	20
Densidad de flujo magnético (T), Tesla	0	0.065	0.5	0.25
Cargas de aplicación (kg SSV/ m ³ d)	0.67	0.56	0.65	0.56
Destrucción de sólidos volátiles (%)	30.8	32.3	41.0	21.8
Producción de biogás (mL/min)	6.1	3.4	6.7	4.6
Gas metano (%)	66	54	75	65

Estabilización de los reactores

La etapa de estabilización comprende el período entre el montaje de los reactores y los primeros resultados estables de reducción de sólidos suspendidos volátiles y producción de biogás. Esta etapa tuvo una duración de tres meses donde se hicieron ajustes y modificaciones a las instalaciones

“Norteamérica y el Caribe en el camino hacia el desarrollo sostenible”

experimentales para obtener mejores resultados. Durante la etapa se realizaron tres corridas experimentales. El lodo residual alimentado durante la aclimatación tuvo las siguientes características promedio: pH de 7.2, conductividad eléctrica de 2.2 mS/cm, SST 52 800 mg/L, SSV 23 500 mg/L. La DQO soluble del sobrenadante de 437 mg/L, alcalinidad 2 950 mg/L de CaCO₃, fósforo total 1 600 mg/L y nitrógeno total de 290 mg/L.

Se observó baja destrucción de SSV durante la etapa, sin embargo, la producción de metano se puede considerar adecuada. Los reactores R1 y R3 presentaron el mejor desempeño con una destrucción de SSV de 14.33% y 14.61% respectivamente. La producción de biogás en los reactores estuvo entre 3.34 y 2.81 mL/min y la concentración de metano entre 18% y 51%. El R2 tuvo menor desempeño y operó con las mismas condiciones que R1, pero sin inducción magnética. Los parámetros de operación estuvieron dentro del rango adecuado para el desarrollo del proceso. Así mismo, las concentraciones de nutrientes son similares en los reactores, los cuales tuvieron concentraciones de 2 000-2 170 mg/L de fósforo total; 2 200-2 550 de nitrógeno total; y de 750-870 mg/L para nitrógeno amoniacal. Es importante la fase de estabilización de un reactor, para continuar el estudio y obtener los mejores resultados del proceso. La aplicación de una inducción magnética como pretratamiento al lodo alimentado al reactor R1, fue benéfico para una rápida estabilización del reactor y una alta producción de biogás.

Etapa 1

En esta etapa se alimentó una mezcla de 40% de lodo primario y 60% de lodo secundario espesado con una concentración entre 30 000 y 34 000 mg/L SSV y aplicando las siguientes cargas orgánicas: 1.12 en R1; 1.17 en R2; 1.54 en R3 y 0.84 kg SSV/ m³ d en R4. El comportamiento de los diferentes parámetros dentro de esta etapa fueron los siguientes: El pH inicial promedio fue de 6.4 y los pH promedio para los reactores R1, R2, R3 y R4 fueron de 7.29, 7.27, 7.28 y 7.29, respectivamente, los cuales son adecuados para la realización del proceso anaerobio. La temperatura promedio estuvo alrededor de 31.7°C. La producción de biogás se estimó mediante desplazamiento obteniendo el mayor desplazamiento en el R2 con 3.66 mL/min y el reactor más lento R4 con un promedio de 2.84 mL/min. El porcentaje de metano en el biogás fue de 36.9% a 39.7%. La remoción de SSV fue máxima en el reactor R1 llegando a 22 000 mg/L y presentando un comportamiento estable. Su remoción fue de 36.77% y la menor remoción la presentó R4 con 23.9% en promedio. La DQO en los reactores al final de la etapa fue alrededor de 4 000 mg/L. Los ácidos grasos volátiles tuvieron un promedio de 830 mg/L, la alcalinidad promedio fue de 4 000 mg/L en los reactores. El Nitrógeno amoniacal igual que el Nitrógeno total aumentó durante el proceso de digestión. El Nitrógeno amoniacal aumentó de 686 mg/L en la alimentación a 1 300 mg/L como promedio en el lodo estabilizado. El fósforo disminuyó de valores promedio de 3 000 mg/L a 2 000 mg/L en el lodo estabilizado.

Etapa 2

La etapa 2 es una repetición de la primera etapa ya que se trabajan con cargas orgánicas similares.

La diferencia más importante es que en esta etapa se pudo trabajar con una mayor temperatura y fue más constante. La etapa se desarrolló con una concentración de 37 000 y 38 000 mg/L SSV en la alimentación y cargas orgánicas de 1.29, 1.36, 1.79 y 0.89 kg SSV/ m³ d para los reactores de R1 a R4 respectivamente. En esta etapa aumentó la temperatura de los reactores con un promedio de 34°C. El reactor R2 tuvo el mayor desplazamiento de 5.8 mL/min y el más lento fue R3 con 3.26 mL/min. En cuanto a la destrucción sólidos suspendidos volátiles, R1 presentó la mayor remoción con un promedio de 32%; seguido de R4 con 29.8%; R3 con 29.2% y por último R2 con una remoción de 28%.

La DQO en esta etapa varió de 6 500 mg/L en la alimentación a valores alrededor de 5 000 mg/L en el lodo estabilizado. Las concentraciones de ácidos grasos volátiles estuvieron alrededor de 1 100 mg/L en todos los reactores y la alcalinidad en los reactores estuvo entre 8 000 y 9 000 mg/L. Los valores de nitrógeno y fósforo son similares a los del experimento anterior. De acuerdo a los resultados obtenidos en estas etapas 1 y 2 trabajando con cargas orgánicas entre 1.79 y 0.84 kg SSV/m³ d, se obtiene una reducción de sólidos volátiles alrededor de 30% y un biogás con un 38% de metano. Aunque esta cantidad de metano es inferior a lo que generalmente se puede obtener de la estabilización anaerobia se puede considerar aceptable por la baja relación de SSV en la alimentación que es alrededor al 40%. Los lodos mejor estabilizados se obtienen en el reactor R1 con TRH de 20 días y pretratamiento magnético.

Etapa 3

Esta etapa se desarrolló con menores cargas orgánicas de 0.59, 0.63, 0.67 y 0.37 kg SSV/m³ d, para los reactores de R1 a R4 respectivamente. Son cargas orgánicas menores a las anteriores y con una mezcla diferente. 20% de lodo primario y 80% de lodo secundario espesado. Esta variación en el porcentaje de la composición de lodo se hizo con el fin de trabajar con cargas menores para lograr mantener el reactor completamente mezclado, ya que con las cargas mayores era más difícil mantener el reactor mezclado formándose zonas muertas y sedimentación de sólidos que disminuyen la eficiencia del tratamiento. Los reactores trabajaron con un pH de 7.4 unidades y una temperatura alrededor de 35°C. Al trabajar con menores cargas, un pH óptimo de 7.4 y una temperatura estable de 35°C se obtuvo una mayor producción de biogás. El desplazamiento aumentó hasta 5.68 mL/min de biogás (R3). Durante esta etapa se obtiene una reducción progresiva de sólidos suspendidos volátiles durante el período de experimentación, figura 1. Los porcentajes de remoción fueron de 52.8% para R1, 25.8% para R2, 38.7% para R3 y 48.8% para R4.

El mayor porcentaje de remoción de SSV se obtuvo en R1, el cual es el que cuenta con la aplicación de una densidad de flujo magnético. Durante esta etapa la concentración de DQO en el lodo estabilizado fue de 10 000 mg/L, la concentración de fósforo total menor a 1 000 mg/L y el nitrógeno total alrededor de 1 400 mg/L.

Etapa 4

Esta se realizó con un TRS de 20 días y aplicación de un pretratamiento magnético. El tiempo de retención hidráulico

“Norteamérica y el Caribe en el camino hacia el desarrollo sostenible”

para los cuatro reactores fue de 20 días, el cual se eligió por presentar mayor destrucción de SSV en los experimentos anteriores. Se emplearon tres densidades de flujo magnético de: 0.0650 T, 0.25 T y 0.5 T y un reactor sin el pretratamiento. Los reactores durante esta etapa operaron con pH de 7.3, temperatura de 35°C y conductividad eléctrica de 5.06 mS/cm.

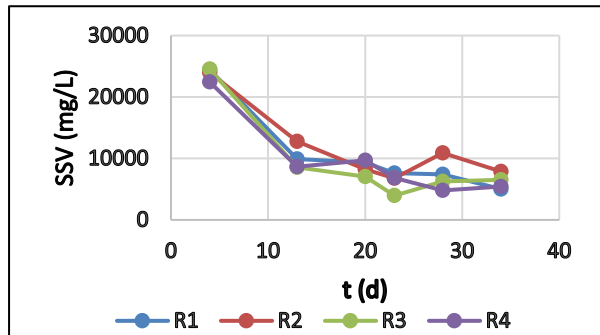


Figura 1. Remoción de SSV en la etapa 3

Las cargas de SSV variaron entre 0.56 kg SSV/m³ d en los reactores R2 y R4 y de 0.67 y 0.65 para los reactores R1 y R3 respectivamente. Los reactores R1 y R3, presentaron los niveles más altos de producción de biogás. La producción más baja se observó en el reactor 2, con la densidad de flujo magnético más bajo. El porcentaje de metano en el biogás se cuantificó arriba del 50%, también se puede observar que el porcentaje más alto de metano en el biogás se obtuvo en el R3 que recibió un pretratamiento con inducción magnética de 0.5 T.

Concentración de fármacos en la mezcla de lodo

En la tabla 2, aparecen las concentraciones de fármacos en las mezclas de lodos que se alimentaron a los reactores.

Tabla 2. Concentración de fármacos neutros en la mezcla de lodo crudo

Mezcla	Fluoxetina µg/Kg	Metoprolol µg/Kg	Ácido Mefenámico µg/Kg
1	0.35	<0.33	165
2	<0.50	<0.50	<4.00
3	3	0.79	<4.0
4	0.47	1.76	21.08
5	<0.33	10.37	<2.66

En todos los muestreos se encontró presencia de estos fármacos excepto en la mezcla 2, donde los tres compuestos se reportan por debajo del límite de cuantificación. La fluoxetina se reporta en intervalos de 3-0.35 µg/Kg y dos muestras <0.33 µg/Kg; el metoprolol en intervalos de 10.37-0.79 µg/Kg y en dos muestreos está por debajo del límite de cuantificación <0.33 µg/Kg. El ácido mefenámico con valores que van de 165-21.08 µg/Kg y tres muestras por debajo del límite de cuantificación <4 µg/Kg.

Lodo estabilizado

El lodo estabilizado y trabajando con las cargas entre 0.6 y 0.3 kg SSV/m³.d presentó el siguiente comportamiento con respecto a la remoción de fármacos: La fluoxetina se removió durante la etapa anaerobia en el reactor R2, con tiempo de retención hidráulico de 20 días y carga orgánica de 0.625 kg SSV/m³.d. La remoción estimada es mayor al 90%. En la alimentación y en R1 el metoprolol presentó una concentración <0.33 µg/Kg y acumulación en los demás reactores, es decir no se obtuvo remoción. El ácido mefenámico obtuvo remoción en todos los tratamientos. La mayor remoción de 92%, se obtuvo en el R2 con tiempos de retención de 20 días. En los otros reactores la remoción fue entre 40% y 50%.

Trabajando con cargas orgánicas mayores, entre 0.82 y 1.5 kg SSV/m³.d, los fármacos neutros presentaron el siguiente comportamiento: La mayor remoción de fluoxetina se presentó en el reactor R1 y R4. La remoción fue de 85%. En el reactor R3 de 80.5%. El R1 trabaja con TRH de 20 días y pretratamiento magnético y el R4 con tiempos de retención hidráulica de 30 días. El metoprolol solo redujo su concentración de 0.797 a 0.5 µg/kg en el R3, con TRH de 15 días y cargas de 1.54 kg SSV/m³ d. El ácido mefenámico, no presentó reducción bajo estas condiciones experimentales.

Con cargas orgánicas entre 0.67 y 0.36 kg SSV/m³.d, los fármacos presentaron el siguiente comportamiento: La Fluoxetina presentó una ligera remoción de 8.5% en el R4 que trabaja con tiempo de retención hidráulico de 30 días y carga orgánica 0.35 kg SSV/m³ d. En los demás reactores se presentó acumulación. El metoprolol también presenta una remoción de 55.11% en el R4. En los otros reactores presenta acumulación. El ácido mefenámico presenta remoción en los reactores R1, R3 y R4 de 22%, 85.54% y 85.25% respectivamente. En esta corrida experimental todos los fármacos se removieron en forma parcial en el R4.

Al trabajar con cargas orgánicas entre 0.56 y 0.63 kg SSV/m³ d, el comportamiento de los fármacos en estudio es el siguiente: Fluoxetina: No se encontró en el lodo crudo y tampoco se detectó en los reactores R2 y R4. Metoprolol: En este experimento hubo remoción del producto en todos los reactores. La mayor remoción se observa en los reactores R1 y R2 con TRH de 20 días y cargas de 0.6 kg SSV/m³ d. La remoción de metoprolol se encontró entre 80.9% y 46.1%. El ácido mefenámico se detectó en el influente por debajo del límite de cuantificación y por lo tanto no hay remoción.

Al realizar el experimento con tiempo de retención hidráulica de 20 días y utilizando como pretratamiento diferentes densidades de flujo magnético, el comportamiento de los fármacos fue el siguiente: Fluoxetina: se observó remoción en los reactores R1, R2 y R3. Metoprolol: no se removió durante el experimento. Ácido mefenámico: Hubo ligera remoción en los reactores R2 y R4 que trabajaron con cargas orgánicas de 0.56 kg SSV/m³.d.

De acuerdo a los resultados obtenidos anteriormente, se observó que ningún fármaco presentó tendencia a removerse completamente durante la estabilización anaerobia.

“Norteamérica y el Caribe en el camino hacia el desarrollo sostenible”

La fluoxetina presentó remoción en algunos de los experimentos pero también se observó una tendencia a acumularse en algunos reactores. Esta acumulación está de acuerdo con la reportada por Malmberg *et al* 2015, donde fluoxetina se acumuló hasta un 122% llegando a una concentración de 10 713 µg/kg en el lodo estabilizado anaerobicamente. El metoprolol presentó reducción de su concentración en algunos experimentos. Por lo tanto puede removerse en forma parcial durante la digestión anaerobia. Narumiya *et al.*, 2013 reportan una remoción completa de este compuesto durante la estabilización anaerobia con una concentración en el lodo crudo de 10 µg/kg. El ácido mefenámico también presentó remoción en algunos reactores. Estudios realizados por Narumiya *et al.*, 2013 reportan que este compuesto tuvo una remoción menor a 50% durante la estabilización anaerobia. No se pudo establecer una correlación entre las cargas orgánicas, los tiempos de retención hidráulica y la inducción magnética aplicada con la remoción observada para estos fármacos. Se requiere mayor seguimiento de estos compuestos durante la estabilización anaerobia.

De acuerdo con los resultados obtenidos durante el experimento la destrucción de sólidos volátiles se incrementó al reducir la carga orgánica. Con cargas en el intervalo entre 1 y 2 kgSSV/m³ d, la destrucción de sólidos volátiles y la producción de biogás es menor que cuando se trabajó con cargas menores a 1 kgSSV/m³ d. Los mejores resultados se obtuvieron con una carga de 0.65 kg SSV/m³ d y aplicación de una densidad de flujo magnético de 0.5 T. Bajo esta condiciones, la remoción de SV fue de 41%, la producción de biogás de 6.7 mL/min y el porcentaje de metano de 75%. El bajo desempeño del proceso con cargas altas se debe principalmente a las malas condiciones de mezclado en los reactores experimentales con altas concentraciones de sólidos. Al no tener un mezclado homogéneo se formaron zonas muertas por acumulación de sólidos y gases que disminuyen el desempeño del proceso

Estabilización aerobia y anóxica

En la tabla 3, se resumen los resultados obtenidos en los procesos de estabilización aerobia y anóxica. Se observa que el lodo estabilizado bajo condiciones aerobias (2 y 5 mg/L de OD) y el anóxico con aplicación de una densidad de flujo magnético alcanzó una estabilización adecuada para evitar la generación de olores, vectores y la reactivación de los procesos de putrefacción.

El tratamiento con 5 mg/L obtuvo mayor estabilización y un sobrenadante de buena calidad, sin embargo, no es necesario realizar el proceso con esta concentración de oxígeno disuelto ya que requiere un gran consumo de energía eléctrica y el proceso aerobio de 2 mg/L puede tener el mismo desempeño.

Tabla 3. Resultados promedio obtenidos en la estabilización anaerobia y anóxica

Parámetro	1*	2*	3*	4*	5*
pH	6.8	7	6.5	5.3	6.3
T (°C)	22	22	22	22	22
O.D. (mg/L)		0.1	2.5	5.2	0.1

Remoción de SSV (%)		9	40	48	40
T.E.C.O. ^o mgO ₂ /mg SSV		1.7	22	8	3.5
Alc. (mg/L) CaCO ₃	2485	541	310	1	167
Calidad sobrenadante					
DQO (mg/L)	2500	2000	1500	500	1500
N-NH ₃ (mg/L)	350	100	50	<5	<10
N-NO ₃ (mg/L)	50	80	100	50	50
Ptotal (mg/L)	200	150	100	100	100
Lodo estabilizado					
Ntotal (mg/kg)		23 000	26 000	20 350	20 260
Ptotal (mg/kg)		5 990	2 140	2 620	4 600

1*(Lodo crudo), 2*(Anóxico), 3*(Aerobio con 2 mg/L OD), 4*(Aerobio con 5 mg/L OD), 5*(Anóxico- flujo magnético).
** (Tasa Especifica de Consumo de Oxígeno)

El lodo estabilizado con cualquier tratamiento tiene una concentración promedio de 2% de nitrógeno total y entre 0.5% y 0.2% de fósforo que puede aprovecharse si se aplica al suelo.

Contenido de fármacos

Las concentraciones de fármacos neutros en lodos crudos y estabilizados aparecen en la tabla 4. De acuerdo a los resultados obtenidos el lodo sin tratamiento contenía 2.8 µg/kg de fluoxetina y 5 µg/kg de ácido mefenámico. El metoprolol se reportó en concentraciones inferiores al límite de cuantificación <0.4 µg/kg.

Tabla 4. Concentración de tóxicos neutros en el lodo crudo y estabilizado

Proceso	Fluoxetina µg/kg	Metoprolol µg/kg	Ácido Mefenámico µg/kg
Lodo	2.8	<0.4	5
Anóxico	2.5	<0.4	15.6
Aerobio 2	0.44	<0.4	20
Aerobio 5	1.9	<0.4	2.4
Anóxico Imán	0.4	<0.4	3.8

“Norteamérica y el Caribe en el camino hacia el desarrollo sostenible”

Como se observa en la figura 2, la fluoxetina se removió durante la estabilización aerobia y anóxica con presencia de flujo magnético. Las remociones alcanzadas fueron de 84% para el aerobio trabajando con 2 mg/L de oxígeno disuelto y de 32% para el aerobio de 5 mg/L. En el reactor anóxico con aplicación de una densidad de flujo magnético la remoción fue de 86%.

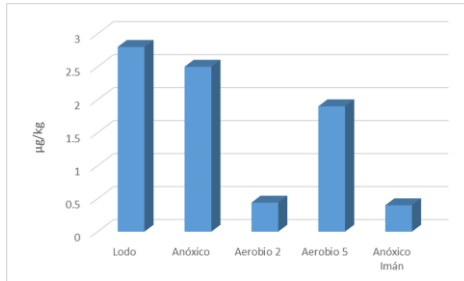


Figura 2. Concentración de fluoxetina en lodo crudo y tratado

El ácido mefenámico fue menos biodegradable, figura 3. Se obtuvo una remoción de 52% en el tratamiento aerobio con 5 mg/L y de 24% en el anóxico con tratamiento magnético.

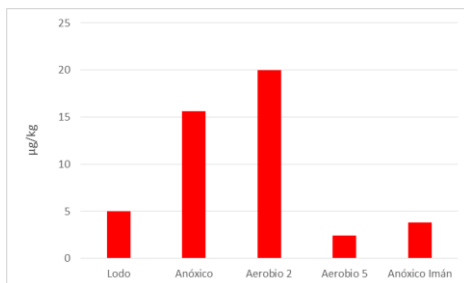


Figura 3. Concentración de ácido mefenámico en lodo crudo y tratado

CONCLUSIONES

Los procesos de estabilización anaerobia, aerobia y anóxica removieron parcialmente los fármacos neutros en estudio. Con los resultados obtenidos no se pudo establecer una correlación entre los parámetros de control de los procesos y la remoción de estos compuestos.

La estabilización anaerobia con aplicación de inducción magnética como pretratamiento mostró efectos positivos sobre el desempeño del proceso con mayor remoción de sólidos volátiles y mayor producción de biogás, los cuales se incrementaron al aumentar la densidad de flujo magnético aplicado.

La estabilización anóxica de lodos con aplicación de una densidad de flujo magnético de baja intensidad logró la estabilización de lodos y se obtuvieron resultados comparables a los que se obtienen con la estabilización aerobia convencional.

La estabilización aerobia con 5 mg/L de oxígeno disuelto incrementó la reducción de sólidos volátiles y se obtuvo un sobrenadante de mejor calidad que el obtenido con la estabilización aerobia de 2 mg/L.

Se recomienda continuar con los estudios de la remoción de compuestos emergentes en la estabilización anaerobia, aerobia y anóxica de lodos para determinar las condiciones de operación que más influyen en la remoción de estos compuestos.

Por las mejoras a los procesos observadas experimentalmente, se recomienda continuar los estudios de la estabilización anaerobia usando como pretratamiento la inducción magnética y de la estabilización anóxica en presencia de una densidad de flujo magnético para definir las condiciones de operación que favorezcan el desempeño de estos procesos.

REFERENCIAS

Flores Velazquez Yolanda y Petia Mijaylova Nacheva. (2017) Removal of pharmaceuticals from municipal wastewater by aerated submerged attached growth reactors, *Journal of Environmental Management* **192**, 243-249

Luo Y, Guo W, Hao H, Duc Nghiem L, Ibney F, Zhang J, Liang S, Wang X (2014) A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of the Total Environment* 473-474:619-641

Mailler, R, I. Gasperi, G. Chelbbo, V. Rocher (2014). Priority pollutants in sewage sludge and fate during sludge treatment. *Waste Management* **34**. 1217-1226

Malmberg, Jonas and Magnér, Jorgen (2015). Pharmaceutical residues in sewage sludge: Effect of sanitization and anaerobic digestion. *Journal of Environmental Management*, **153**, 1-10.

Narumiya, Masanori., Nakda, Norihibe., Yamashita Naoyuki., Tanaka, Hiroaki (2013). Phase distribution and removal pharmaceuticals and personal care products during anaerobic sludge digestion. *Journal of Hazardous Materials*, **260**, 305-312.

Sacher, Frank, Frank Thomas Lange, Heinz-Jürgen Brauch, Iris Blankenhorn (2001) Pharmaceutical in groundwater. Analytical methods and results of a monitoring program in Baden-Württemberg, Germany. *Journal of Chromatography A*. **938** 199-210.

Seblante Galilee U, Faisal I Hai, Xia Huang, Andrew S, Ball, William E. Price, Long D. Nghiem (2015). *Hazardous trace organic contaminants in biosolids: Impact of conventional wastewater and sludge processing technologies and emerging alternatives*. *Journal of Hazardous Materials*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.06.037>

(i) Flores, Y, N. Ramírez, M. Sánchez, P. Mijaylova, L.A. González (2015). Method development for the determination of Fluoxetine, Mefenamic Acid and Metoprolol concentrations in wastewater and suspended biomass. En: *Solución a la problemática del agua. Propuesta de jóvenes Investigadores*. 1ª Ed. ISBN: 978-607-441-404-2. Universidad de Guanajuato. Guanajuato, México

(ii) Stamatelatos, K, C Pakou, G Lyberatos (2011). *Occurrence, Toxicity, and Biodegradation of Selected Emerging Priority Pollutants in Municipal Sewage Sludge*. © 2011 Elsevier B.V.

(iii) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2012). 22th edn. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA