

Influencia de la variación temporal de fenoles y materia orgánica sobre la capacidad de degradación de la biota bacteriana en un reactor anaerobio de flujo a pistón (RAP)

Javier Mauricio González Díaz* / Lady Catalina Celis Quintero** / William Rodrigo Castañeda Beltrán***

Fecha de envío: 1 de septiembre de 2010

Fecha de aceptación: 22 de noviembre de 2010

RESUMEN

La presente investigación propone un sistema de tratamiento anaerobio encargado de reducir las cargas contaminantes presentes en los vertimientos generados por la clínica veterinaria de la Universidad de La Salle, mediante la acción directa de la actividad microbiana ejercida por las bacterias contenidas en el lodo inoculado en el reactor anaerobio de flujo a pistón (RAP) diseñado para tal fin. Se establecen además las acciones requeridas para mantener estable la operación del reactor en cuanto al aporte de las bacterias metanogénicas y sulfato reductoras, mediante el desarrollo de análisis de laboratorio y determinación de parámetros *in situ*, lo cual permite definir los factores ambientales que inciden en el comportamiento de la biota bacteriana del reactor y, a su vez, la capacidad de degradación de compuestos

orgánicos presentada por éstas. Finalmente, parte de la verificación demostró que el aumento en las concentraciones de fenol en el afluente del RAP podrían desestabilizar los procesos anaerobios debido a la inhibición de la producción de por parte de las bacterias presentes en el reactor, ya que este compuesto es considerado como tóxico y al ser usado como sustrato en los procesos de digestión anaerobia ocasiona desequilibrio en el metabolismo bacteriano.

Palabras clave: sistema de tratamiento anaerobio, actividad microbiana, reactor anaerobio de flujo a pistón, bacterias metanogénicas y sulfato reductoras, capacidad de degradación, aguas residuales.

* Ingeniero Ambiental y Sanitario, Docente de Planta, Facultad de Ingeniería, Programa Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: javigonzaez@unisalle.edu.co.

** Ingeniera Ambiental y Sanitaria, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia.

*** Ingeniero Ambiental y Sanitario, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia.

INFLUENCE OF TIME VARIATION OF PHENOLS AND ORGANIC MATTER ON THE DEGRADATION CAPACITY OF BACTERIAL BIOTA IN AN ANAEROBIC PLUG FLOW REACTOR

ABSTRACT

This investigation proposes an anaerobic treatment system responsible for reducing the pollutant loads that are present in the waste water generated by the veterinary clinic of the Universidad de La Salle, by means of the direct action of the microbial activity exerted by the bacteria contained within the inoculated mud in the plug flow anaerobic reactor (RAP), designed for such goal. Establishes too the required actions to maintain steady the operation of the RAP in regard to the contribution of the methanogenic bacteria and sulphate reducers, by means of the development of laboratory analysis and the determination of in situ parameters, which allows to define the environmental factors that affect the behavior of the bacterial biota of the reactor and at its time the capacity of degradation

of organic compounds presented by them. Finally, a part of the verification demonstrated that the increase in the Phenol concentrations in the affluent of the RAP could destabilize the anaerobic processes due to the inhibition of the methane production by the bacteria present in the reactor, due to this compound is considered as toxic and when is used as substrate in the anaerobic digestion processes causes imbalance in the bacterial metabolism.

Keywords: anaerobic treatment system, microbial activity, anaerobic plug flow reactor, methanogenic bacteria and sulphate-reducers, degradation capacity, waste water.

INTRODUCCIÓN

La calidad del agua es un factor que limita la disponibilidad del recurso hídrico y restringe su uso; el aumento en la demanda de agua tiene como consecuencia un incremento en el volumen de los residuos líquidos, cuya descarga sin una apropiada recolección, evacuación y tratamiento, deteriora la calidad de las aguas y contribuye con los problemas de disponibilidad del recurso hídrico. Por tal razón, con el tiempo han venido surgiendo proyectos de investigación que buscan introducir pequeños aportes al mejoramiento de los sistemas de tratamiento existentes con el único propósito de lograr un aumento significativo sobre la reducción de sustancias contaminantes presentes en el agua residual.

Los efectos que causan las aguas residuales sin tratamiento, descargadas a cuerpos hídricos receptores constituyen una fuente de contaminación para la población ya que son portadoras de sustancias de interés sanitario que alteran la salud humana y a los ecosistemas en general; en los últimos años se ha incrementado el interés por los sistemas de tratamiento anaerobio, ya que se consideran una importante alternativa en la depuración de las aguas residuales por su simplicidad y menor demanda de energía frente a los sistemas aerobios.

Debido a la creciente necesidad de implementar sistemas anaerobios que permitan reducir de manera considerable la concentración de contaminantes en las aguas residuales, en la presente investigación se establece el tratamiento de los vertimientos provenientes de la clínica veterinaria de la Universidad de La Salle, sede La Floresta, mediante un reactor anaerobio de flujo a pistón (RAP) haciendo especial énfasis sobre la capacidad degradadora de la biota bacteriana nativa, en la reducción de compuestos como el fenol y la materia orgánica, así como el aporte

generado por el uso de medios de soporte natural y sintético con el propósito de evaluar sobre cuál de ellos se hace más representativa la incidencia de los aspectos mencionados.

La metodología aplicada en esta investigación se divide en cuatro fases correspondientes al compendio bibliográfico de la información requerida para establecer la base teórica del estudio; una segunda fase de preexperimentación en la que se fijaron las pautas requeridas para lograr una operación eficiente del RAP; la tercera fase metodológica comprende el aporte experimental de la investigación lo cual fundamenta los análisis de resultados consignados en la cuarta fase de este documento.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos en esta investigación y su respectivo análisis, teniendo como punto de partida el cumplimiento de los objetivos propuestos, la aplicación de los fundamentos teóricos existentes para el tema principal de la investigación y la verificación de la carga orgánica superficial y volumétrica requeridas para garantizar el óptimo funcionamiento del reactor; para la validación de los datos obtenidos durante el desarrollo del estudio se implementaron pruebas estadísticas no paramétricas debido a la cantidad y complejidad de los datos analizados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se desarrolla como un aporte al proyecto de investigación titulado *Análisis comparativo entre medios de soporte fijo (guadua y espuma de poliuretano junto con plantas macrófitas), en reactores de flujo a pistón para remoción de fenoles y materia orgánica en aguas residuales* (Balda, et ál., 2008), mediante el cual se pretende establecer una aproximación del comportamiento microbiológico sobre la eficiencia en remoción de cargas contaminantes del reactor anaerobio de flujo a pistón (RAP),

instalado para el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la clínica veterinaria y los laboratorios de histopatología de la Universidad de La Salle, sede La Floresta.

COMPENDIO BIBLIOGRÁFICO

En la primera fase se establecen los temas de interés que componen el enfoque conceptual, teniendo en cuenta la perspectiva de la investigación desde el punto de vista ingenieril y microbiológico, de tal manera que el desarrollo de la temática sea claro y preciso; además de contemplar la teoría, se hizo necesario mencionar la base normativa sobre la que se fundamenta el tratamiento y manejo de las aguas residuales, planteando así el marco legal, donde se presenta de forma general la normatividad ambiental aplicable a la presente investigación.

Dentro del enfoque conceptual se presentaron las temáticas relacionadas con: tratamiento de aguas residuales, sistemas de tratamiento anaerobio, procesos anaerobios, biodegradación de compuestos orgánicos y digestión anaerobia. Por otra parte, la recopilación bibliográfica involucra la descripción general de las actividades desarrolladas por la clínica veterinaria de la Universidad de La Salle, sede La Floresta, y la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales allí generadas.

FASE DE ARRANQUE Y PUESTA EN MARCHA

Dentro de esta fase resulta importante resaltar que el diseño y construcción del sistema de tratamiento piloto no es objeto de la presente investigación debido a que estas actividades fueron desarrolladas durante la primera etapa del proyecto de investigación principal a cargo de los docentes de la facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria.

La fase de arranque y puesta en marcha del reactor anaerobio de flujo a pistón (RAP) comprende la ejecución de algunas actividades para garantizar la alimentación y la continuidad del flujo al sistema: pruebas hidráulicas para verificar el régimen y tipo de flujo, así como la identificación de posibles fugas y fallas en las líneas de conducción, acople y empaque del medio de soporte fijo (guadua y espuma de poliuretano), inoculación del lodo anaerobio, regulación de caudales y determinación del tiempo de retención hidráulico.

PREEXPERIMENTACIÓN

El desarrollo de esta fase se llevó a cabo paralelamente a la fase de arranque y puesta en marcha. Las pruebas realizadas permitieron establecer la calidad biológica del lodo inoculado con el fin de evaluar su capacidad de adaptación al sustrato y a los factores de operación del sistema; los análisis involucrados en esta primera etapa corresponden a: perfil de lodos, índice volumétrico de lodos (IVL), granulometría, biodegradabilidad anaerobia del residuo (BAR), actividad metanogénica específica (AME) y adicionalmente la prueba de toxicidad anaerobia (TA), con el propósito de identificar el rango de tolerancia de la biota bacteriana a diferentes concentraciones de fenol; las pruebas mencionadas anteriormente corresponden a mediciones indirectas de la biomasa activa.

Por otra parte, se realizaron ensayos de la *demanda química de oxígeno* (DQO) y de la concentración de fenoles, a la entrada y salida del proceso biológico con el fin de evaluar el comportamiento de éste durante la fase de arranque; además, se tuvieron en cuenta las concentraciones de fenol presentadas en el afluente para determinar la influencia de su variación sobre el comportamiento de la biota bacteriana.

Como medidas de control en el comportamiento biológico del reactor se midieron el pH y la temperatura como parámetros *in situ*; en laboratorio se realizaron las determinaciones de alcalinidad, ácidos grasos volátiles (AGV), sulfatos y sólidos suspendidos volátiles (SSV), con el fin de evaluar el proceso de estabilización del RAP y la influencia de cada uno de dichos parámetros sobre los procesos anaerobios allí generados.

Posteriormente, se procedió a verificar la presencia de bacterias degradadoras de fenol, mediante el análisis del *número más probable* (NMP); los datos obtenidos en dicho recuento fueron analizados con el software *Most Probable Number Calculator*, versión 4.04 desarrollado por la agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA)¹¹. Una vez realizada la verificación, se llevó a cabo una siembra directa de las muestras de lodo de cada tren de muestreo, una muestra control del inóculo y el afluente del reactor en seis medios de cultivo diferentes para identificar los tipos de microorganismos anaerobios existentes.

Sin embargo, para comprobar la actividad microbiana en función de la producción de CH₄, se realizó la prueba de actividad metanogénica específica acetoclástica AME, una vez por semana, en las muestras de lodo extraídas de cada tren de muestreo con el fin de correlacionar el crecimiento de los consorcios microbianos (biomasa activa) y la cantidad de CH₄ generado.

EXPERIMENTACIÓN

Durante el desarrollo de esta fase se pretende comprobar la tolerancia de los microorganismos al fenol mediante su aislamiento e identificación, de acuerdo con los resultados obtenidos en la fase de preexpe-

rimentación; por otra parte, se establecen las relaciones de comportamiento anaerobio teniendo en cuenta los parámetros de control establecidos en la tercera fase de esta investigación y su relación con la eficiencia en remoción de cargas contaminantes a través del tratamiento biológico implementado.

Esta fase se divide en dos etapas generales donde se evalúa la estabilización y operación del RAP y las eficiencias en remoción de cargas contaminantes presentadas por éste; en la primera etapa, se determina el control sobre el comportamiento de la digestión anaerobia; en la segunda, se evalúan las eficiencias en remoción de cargas (DQO y fenoles), en función de la producción de CH₄, los parámetros de control y las unidades formadoras de colonia (UFC); además se establece la carga orgánica superficial (COS) y la carga orgánica volumétrica (COV) de operación del reactor.

El desarrollo de esta fase se ejecutó en las nueve (9) semanas siguientes a la culminación de la preexperimentación contadas a partir del día seis (6) de octubre de 2008, obteniendo así un periodo total de veintidós (22) semanas para la realización de la presente investigación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CALIDAD BIOLÓGICA DEL LODO. RESULTADOS CARACTERIZACIÓN DEL INÓCULO DE LODO

El ensayo del perfil de lodos permite cuantificar la concentración de biomasa en diferentes puntos del reactor a lo largo del manto de lodos, identificando de esta forma la zona de mayor actividad de la biomasa en relación con la cantidad de SSV. En relación con los datos obtenidos, el lodo granular de la cooperativa Colanta presenta una concentración de SSV

11 Disponible en forma gratuita en: www.epa.gov/microbes/other.htm.

en un rango de 300000 mg/L a 500000 mg/L, además de presentar una relación de SSV/SST superior a 0,90 lo que indica la proporción de biomasa presente en el lodo, garantizando que la muestra corresponde a un lodo netamente biológico. Según lo mencionado anteriormente, se define el punto de muestreo 2 del reactor origen, como aquel que aporta el lodo con mayor contenido de biomasa teniendo en cuenta la concentración de SSV y una relación de SSV/SST capaz de mineralizar en mayor proporción los compuestos orgánicos por acción de los consorcios microbianos adheridos a los conglomerados de lodo.

RESULTADOS DE VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN E IVL

El ensayo se realizó con el lodo proveniente del punto de muestreo 2 del tanque de metanización, en relación con los resultados obtenidos; se pudo establecer que la rapidez de sedimentación del lodo inoculado en el RAP es del orden de 8,82 m/h lo que permite la retención de grandes cantidades de lodo en el reactor en intervalos de tiempo más reducidos que los presentados por sistemas anaerobios convencionales.

El comportamiento de la velocidad de sedimentación del lodo fue de 0,8 min y la aglomeración total del lodo se llevó a cabo en el mismo periodo, por lo que se infiere que en el interior del RAP, el arrastre de la biomasa será mínimo y, por ende, se garantiza la permanencia de una importante cantidad de biomasa activa en el interior del sistema, responsable de los procesos anaerobios allí desarrollados fundamentados en la composición bacteriana de cada uno de los gránulos.

Por su parte, la capacidad de sedimentación y compactación del lodo se determinó mediante el índice volumétrico de lodos (IVL), para el cual se obtuvo un resultado final de 2,182 ml/mg, confirmando que dicha muestra presenta una elevada capacidad de se-

dimentación y compactación, lo que garantiza que el volumen de lodo contenido en el RAP no sería arrastrado con el efluente.

RESULTADOS DE BIODEGRADABILIDAD ANAEROBIA

Para el desarrollo de la prueba se empleó una muestra de agua residual proveniente del afluente del RAP, la cual presentó una concentración de DQO de 412 mg/L y una concentración de fenol de 7,0 mg/l, ya que en dichas condiciones fue posible evaluar la influencia de altas concentraciones de fenol sobre la degradación de la materia orgánica.

En general, la biodegradabilidad anaerobia alcanzada por el residuo empleado durante la prueba demostró que la influencia de los AGV, el pH y la alcalinidad establecen el desarrollo de cada una de las etapas de la digestión anaerobia de las aguas residuales, especialmente sobre la conversión de los compuestos orgánicos a productos finales como el CH₄ y el CO₂.

Por su parte, la producción de CH₄ demostró que el acetato y el hidrógeno fueron consumidos eficientemente por las bacterias metanogénicas garantizando que las etapas preliminares no fueron afectadas por la acción de los compuestos orgánicos incluido el fenol, el cual ejerce un efecto inhibitorio sobre el metabolismo de la biota bacteriana debido a su naturaleza tóxica.

En cuanto a la remoción de DQO se infiere que el agua residual tratada por el RAP es altamente biodegradable por las vías anaerobias, ya que el porcentaje de remoción superó el 90% por el control ejercido sobre las variables de interés de este ensayo; finalmente, cabe anotar que en relación con la producción celular el lodo inoculado en el RAP posee una calidad biológica óptima representada por la acción de las bacterias fermentadoras y metanogénicas (figura 1).

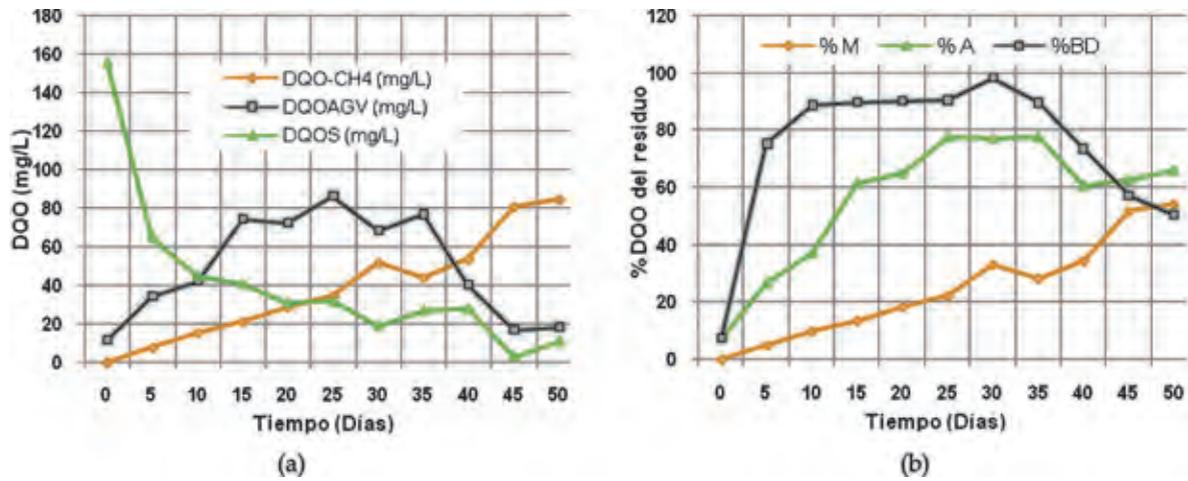


Figura 1. Balance final de la DQO neta (a) y porcentajes de conversión del residuo (b)

Fuente: elaboración de los autores (2009).

RESULTADOS DE ACTIVIDAD METANOGÉNICA ESPECÍFICA (AME)

Los valores registrados de la actividad metanogénica para el inóculo de lodo se ubican dentro del rango sugerido por la literatura para un lodo granular (0,2 a 1,9 g DQO-CH₄ / g SSV-día), lo que garantiza que la actividad ejercida por los consorcios microbianos es óptima sobre el tratamiento de efluentes industriales con alto contenido de compuestos orgánicos y eventualmente tóxicos.

RESULTADOS DE TOXICIDAD ANAEROBIA (TA)

La toxicidad anaerobia se desarrolló bajo el mismo principio de la actividad metanogénica y la biodegradabilidad anaerobia en cuanto al método empleado para la medición del CH₄ producido; los resultados obtenidos se representan mediante el comportamiento de las curvas de la figura 2, las cuales se expresan en función del tiempo y de las concentraciones de fenol empleadas en la prueba.

El incremento en las concentraciones de fenol empleadas en la prueba generan un efecto inhibitorio sobre la actividad bacteriana de los consorcios mi-

crobianos –traducido en la producción reducida de CH₄ y un tiempo de respuesta menor al presentado por el control–. El efecto tóxico aportado por la introducción del fenol en los ambientes anaerobios de la prueba suponen una adaptación tardía de las bacterias al sustrato, con mayores tiempos para la degradación de los compuestos y bajas tasas de remoción de éste.

Por su parte, la relación directamente proporcional entre el comportamiento del agua residual y la concentración de 10 ppm permite definir que el aporte de materia orgánica sumado a las concentraciones de fenol, pueden llegar a causar mayor influencia sobre la actividad de las bacterias que el efecto tóxico de las concentraciones de fenol individualmente.

En cuanto a la tasa máxima de producción de CH₄ es importante mencionar que se calculó usando el método de regresión lineal para obtener la pendiente máxima de cada curva y poder establecer para cuál de ellas se presentaba el menor valor de producción de CH₄ encontrándose que a medida que aumentaba la concentración de fenol la pendiente de la gráfica se reducía, lo que permitió confirmar el efecto tóxico del fenol sobre la actividad bacteriana.

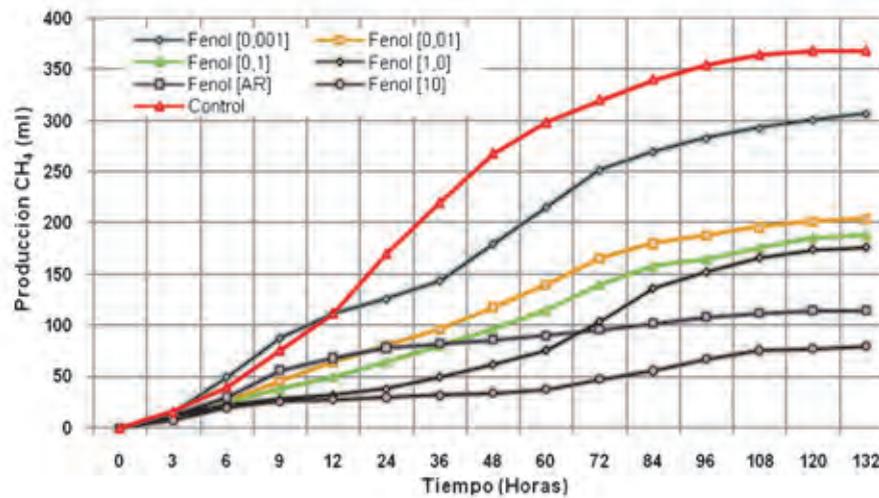


Figura 2. Producción de CH₄ a diferentes concentraciones de fenol

Fuente: elaboración de los autores (2009).

ANÁLISIS DEL NÚMERO MÁS PROBABLE (NMP)

La determinación del NMP con el método en placas multipozos permitió definir y verificar la presencia de bacterias encargadas de transformar los compuestos fenólicos en las diferentes muestras de lodo empleadas, teniendo en cuenta que no fue posible establecer los grupos y géneros bacterianos encargados de llevar a cabo dicha función, debido a que el método se basa en una titulación simple influenciada por la respiración activa de los microorganismos involucrados en la digestión anaerobia de estos compuestos.

La identificación de bacterias degradadoras de fenol en las muestras de lodo extraídas del RAP, confirmó que la actividad bacteriana en el reactor alcanzó una estabilidad considerable a la altura de la séptima semana de operación, lo cual se fundamenta en la adaptación de los consorcios bacterianos al sustrato, a la variación de las concentraciones de fenol contenidas en el afluente y a las condiciones de anaerobiosis presentadas por el sistema de tratamiento.

TOLERANCIA PRESENTADA POR LAS BM Y BSR A LA VARIACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE FENOL

En comparación con los resultados obtenidos para el análisis del NMP, en este punto de la investigación se hizo posible determinar la cantidad de bacterias de los grupos metanogénicas y sulfato reductoras con capacidad de crecer en ambientes influenciados por el efecto tóxico del fenol, lo que permitió definir claramente el aporte de dichas bacterias a la eficiencia de operación reportada por el RAP, ya que inicialmente y con el método del NMP sólo fue posible establecer la presencia o ausencia de consorcios bacterianos contenidos en el inóculo de lodo con capacidad para degradar el fenol.

En el medio de soporte sintético, el comportamiento registrado durante las dos primeras semanas obedece al escenario ideal para el crecimiento de bacterias metanogénicas y sulfato reductoras frente a la variación de las concentraciones de fenol, ya que al aumentar la concentración de este compuesto se evidencia una

reducción proporcional en las UFC/ml aportadas por cada grupo de bacterias, resaltando la predominancia de las BM sobre las BSR, lo cual puede atribuirse a la incidencia del origen del lodo inoculado, a la no com-

petencia por sustratos comunes y a la interrelación de estos grupos bacterianos durante la degradación de la materia orgánica (figura 3).

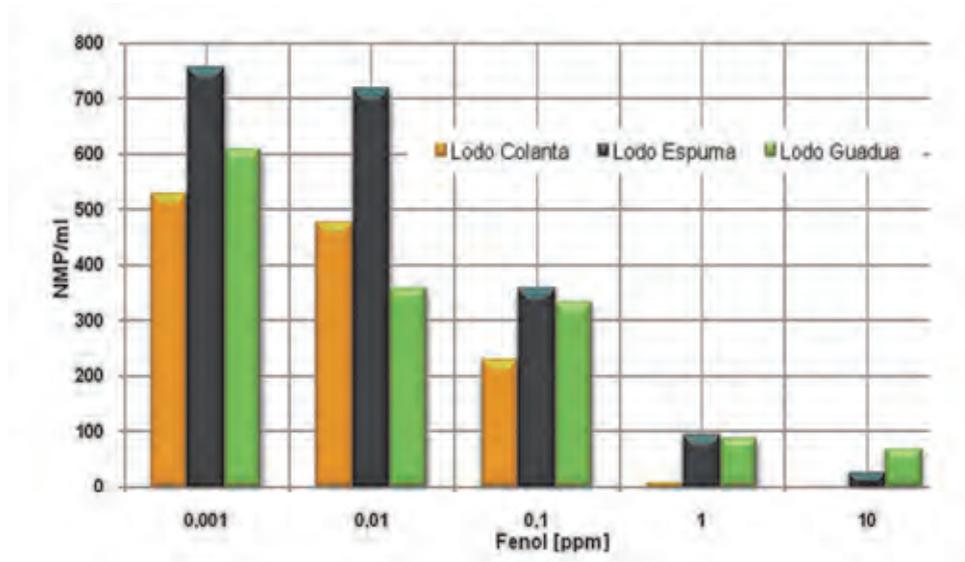


Figura 3. Comportamiento del NMP de bacterias / g SSV degradadoras de fenol

Fuente: elaboración de los autores (2009).

RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL COMPORTAMIENTO PRESENTADO POR EL CRECIMIENTO DE LAS BM Y LAS BSR

De acuerdo con los resultados obtenidos en el diseño de medidas repetidas, fue necesario aplicar un diseño factorial con bloques totalmente aleatorizados de efectos fijos, ya que el análisis factorial es una técnica de reducción de datos que sirve para encontrar grupos homogéneos de variables que se correlacionen entre sí y permitan que unos grupos sean independientes de otros.

De lo anterior se deduce que la concentración de fenol, el tipo de medio y el grupo bacteriano ejercen influencia sobre el crecimiento de las bacterias, en relación con el nivel de significancia presentado en la tabla 1 (Sig. $\leq 0,05$). Por otra parte, es importante

mencionar que el nivel de significancia de las concentraciones de DQO y el tiempo no alcanza a ser registrados en la matriz debido a que los gl no fueron suficientes para el desarrollo de este diseño.

Debido a la evidencia estadística encontrada, se logró deducir que el periodo de estabilización del reactor inició en la quinta semana de la fase de experimentación en cuanto al crecimiento presentado por los grupos bacterianos analizados, los cuales pueden llegar a tolerar concentraciones de fenol hasta un rango de [10 ppm] sin presentar inhibición sobre el incremento de las poblaciones bacterianas; de igual forma el rango de la DQO que favorece la estabilidad de los procesos anaerobios, se constituye en las semanas 5 y 9, resaltando que durante la novena semana la operación del reactor demostró ser eficiente al presentar equilibrio entre los procesos biológicos allí desarrollados y la calidad final del efluente.

Finalmente, con este diseño estadístico se verificó el periodo de estabilización del reactor y las concentraciones de contaminantes que soporta el RAP para operar eficientemente, fundamentando de esta forma

la importancia de la actividad bacteriana sobre la remoción de cargas contaminantes debida a la degradación de compuestos tóxicos.

Tabla 1. Análisis de varianza univariante sobre las pruebas de efectos intersujetos.

Origen	Suma cuadrados tipo III	gl.	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	1,484E11	14	1,060E10	23,956	0,000
Intersección	1,982E11	1	1,982E11	447,680	0,000
Semana	0,000	0			
Fenol	8,959E9	4	2,240E9	5,060	0,001
DQO	0,000	0			
Medio	1,411E10	1	1,411E10	31,884	0,000
Bacteria	4,896E9	1	4,896E9	11,062	0,001
Error	7,303E10	165	4,426E8		
Total	4,196E11	180			
Total corregida	2,215E11	179			
$R^2 = 0,670$ (R^2 corregida = 0,642).					

Fuente: elaboración propia (2009).

RESULTADOS DE RELACIONES DE COMPORTAMIENTO ANAEROBIO DENTRO DE LA ESTABILIZACIÓN Y OPERACIÓN DEL RAP

Frente a los objetivos planteados para esta investigación, en este numeral se pretenden definir de forma general algunas relaciones de comportamiento anaerobio propuestas por los autores, las cuales podrían ser tenidas en cuenta como parámetros de control en la operación de reactores anaerobios, en cuanto a las concentraciones de DQO que puede soportar el sistema y su relación directa con la fracción soluble de los ácidos orgánicos y la alcalinidad bicarbonácea, siendo estos últimos factores, parámetros determinantes en la estabilidad de los procesos anaerobios.

RESULTADOS DE RELACIÓN ANAEROBIA DQO/ ALCALINIDAD FRENTE AL % DE REMOCIÓN EN CARGAS CONTAMINANTES

La figura 4 relaciona el perfil correspondiente a la relación entre las concentraciones de DQO y alcalinidad aportadas al sistema de tratamiento, frente a la eficiencia en remoción de materia orgánica y fenol; como es evidente el comportamiento de la remoción de cargas contaminantes sobre cada uno de los medios de soporte es similar, resaltando que la eficiencia reportada para la DQO es inversamente proporcional a la eficiencia en remoción de fenol, lo que se fundamenta con la asimilación de la DQO como sustrato principal para los grupos bacterianos presentes

en el sistema de tratamiento, ya que su degradación es simple frente a la tolerancia y transformación de los compuestos fenólicos.

De la gráfica 4, se deduce que la relación DQO/alcalinidad se considera viable mientras alcance una eficiencia $\geq 80\%$ en remoción de cargas contaminantes para cada uno de los trenes de muestreo, por lo que se propone un rango para la DQO entre 224 y 412 mg/L y de 96 a 166 mg/L de CaCO_3 en relación con las concentraciones medias de alcalinidad; el valor medio considerado para esta relación según el perfil realizado y la eficiencia de remoción obtenida se estima cercano a $2 \pm 0,5$.

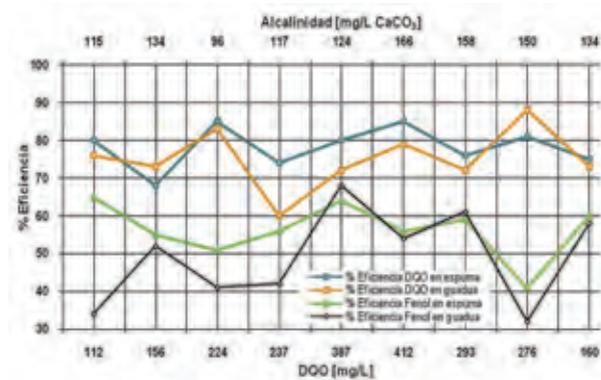


Figura 4. Variación de la eficiencia frente a la relación anaerobia DQO/alcalinidad

Fuente: elaboración propia (2009).

RESULTADOS DE RELACIÓN ANAEROBIA DQO/AGV FRENTE AL % DE REMOCIÓN EN CARGAS CONTAMINANTES

Los resultados en la figura 5 presentan la relación existente entre las concentraciones de DQO y la proporción media de los AGV, evidenciando que la variación del porcentaje de eficiencia en la remoción de materia orgánica se debe a que a concentraciones bajas de ácidos grasos se establece la disminución en la disponibilidad de sustratos para las bacterias involucradas en la digestión anaerobia de los compuestos orgánicos, mientras que a concentraciones

superiores la inhibición bacteriana podría llevarse a cabo por la absorción de estos ácidos alterando las funciones celulares y siendo entonces responsables de la toxicidad.

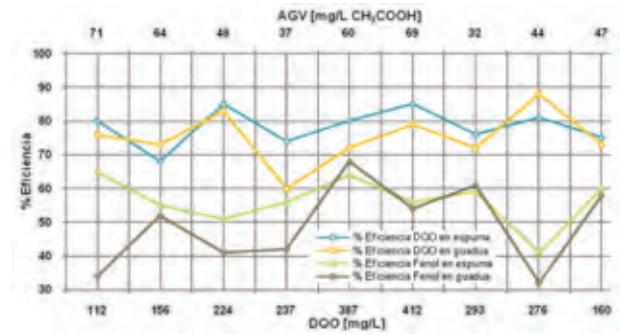


Figura 5. Variación de la eficiencia frente a la relación anaerobia DQO/AGV

Fuente: elaboración propia (2009).

La relación existente entre las concentraciones de DQO y AGV debe ser proporcional para que el aporte generado por ambos compuestos no altere el ambiente propicio para que se lleve a cabo el metabolismo bacteriano dentro del proceso de degradación anaerobia de la materia orgánica y los compuestos fenólicos. De acuerdo con lo anterior, es posible establecer que el rango óptimo para las concentraciones de AGV es de 44 a 69 mg/L CH_3COOH y de 224 a 412 mg/L para DQO estimando un valor para la relación cercano a $5 \pm 0,5$, con el que se garantizan periodos de estabilidad en el interior del reactor y, en consecuencia, un incremento sobre la eficiencia en remoción de cargas contaminantes.

RESULTADOS DE VARIACIÓN DE LA EFICIENCIA PRESENTADA POR EL RAP

RESULTADOS DE LA INCIDENCIA DE COS Y COV SOBRE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DEL RAP

Debido a que COS y COV se consideran parámetros de diseño en reactores anaerobios, en esta investigación se consideró relevante evaluarlos desde el punto

de vista de las superficies de adherencia y el volumen que puede contener a la biomasa activa dentro del reactor, evitando así el arrastre de los consorcios bacterianos involucrados y permitiendo que exista mayor superficie de contacto entre los microorganismos y el sustrato contenido en el agua residual.

RESULTADOS DE LA CORRELACIÓN ENTRE COS Y EL CAUDAL SOBRE LA EFICIENCIA DEL RAP

Se consideró como rango óptimo para la operación del RAP una COS de 6,2 a 15,3 (g DQO/m² – día), resaltando que en algunos casos se evidenciaban variaciones en el comportamiento regular, lo cual puede ser explicado por los procesos de estabilización del reactor, los periodos incontrolados de lluvia y la no homogeneidad de las cargas en el afluente del sistema de tratamiento.

En cuanto al medio de soporte natural, es importante mencionar que aunque éste registra menor área superficial que el medio sintético, alcanza valores elevados para COS, lo que define que este aspecto es inverso al comportamiento general de la carga orgánica, es decir, que no se requieren grandes áreas superficiales para garantizar una condición de operación estable en los reactores anaerobios, y por ende obtener eficiencias superiores al 80% en remoción de cargas contaminantes.

Sin embargo, el incremento en COS conlleva al aumento de la eficiencia en remoción de fenoles destacando que para valores \leq a 200 (g DQO/m²-d) ésta tiende a equilibrarse con la eficiencia en remoción de materia orgánica. Los grupos bacterianos involucrados en la degradación de los compuestos orgánicos también son influenciados por COS, ya que al tolerar cargas superficiales elevadas, teniendo como factor limitante el área superficial de los medios, pueden llegar a soportar y asimilar incrementos drásticos en los contaminantes contenidos en el afluente del reac-

tor, los que finalmente son transformados en sustratos útiles para el metabolismo bacteriano.

RESULTADOS DE LA CORRELACIÓN ENTRE COV Y EL CAUDAL SOBRE LA EFICIENCIA DEL RAP

En relación con los resultados obtenidos para esta etapa de la investigación, es posible obtener como rango óptimo de operación del reactor un estimado entre 1,5 a 3,0 kg DQO/m³ – día para obtener eficiencias en remoción entre el 70 y 80% para la DQO y del 50 al 60% en remoción de fenoles.

Sobre el medio de soporte natural (guadua *angustifolia*) se reportaron eficiencias superiores al 80% en remoción de la DQO, manejando un rango de 5,0 a 12,0 kg DQO/m³ – día para la carga orgánica volumétrica y cercanas al 60% para la remoción de fenol. De acuerdo con lo anterior es posible establecer que en general se ha reportado que para lograr eficiencias superiores a los valores estimados, generalmente son empleados medios de soporte sintéticos, lo que conlleva a afirmar que en cuanto a la aplicación de cargas orgánicas volumétricas los medios de soporte natural pueden aportar mayor estabilidad en los procesos anaerobios y, por ende, beneficios económicos representados en sus bajos costos.

Finalmente, es conveniente destacar que tanto COS como COV se calcularon teniendo en cuenta el área y el volumen sobre cada uno de los medios de soporte contenidos en cada tren de muestreo, debido a que el objeto principal de esta investigación se centró en la determinación de la capacidad de degradación de la biota bacteriana adherida y soportada, tanto por el reactor como por el medio, razón por la que se consideraron los parámetros de diseño mencionados en este numeral para definir la eficiencia en remoción de cargas contaminantes afectada por la variación de éstos, ya que dependen de la velocidad del flujo, haciendo evidente la propiedad filtrante del RAP y el incremento en los tiempos de retención celular.

CONCLUSIONES

1. Durante el desarrollo de la investigación, se llevó a cabo el arranque y operación del RAP, bajo la aplicación de la totalidad de los parámetros de control y condiciones técnicas requeridas para el mantenimiento y estabilización de reactores anaerobios.
2. En relación con la calidad biológica del lodo, es posible concluir que el inóculo de lodo realizado en el reactor demostró que éste contaba con una buena capacidad de adaptación sobre los medios de soporte manejados en este estudio, y que teniendo en cuenta su procedencia logró asimilar y tolerar satisfactoriamente la variación de las concentraciones de DQO y fenol, expresadas como sustrato para los grupos bacterianos desarrollados en la biomasa activa.
3. Aunque la biodegradabilidad anaerobia presentó porcentajes de remoción en DQO superiores al 90%, no es posible considerar que estas eficiencias fueron alcanzadas por el RAP, debido a las condiciones en las cuales fueron controlados los ensayos en el laboratorio y las condiciones y factores ambientales influyentes en la operación del reactor.
4. El fenol se considera una sustancia inhibitoria de la AME en reactores anaerobios, situación que conlleva a una disminución en la remoción de materia orgánica y, por ende, bajas eficiencias de remoción en el tratamiento. La determinación se realizó mediante la CI_{50} estimada con los resultados obtenidos en la prueba de toxicidad anaerobia, la cual reportó un valor de [2,0 ppm] de fenol como la concentración que logra inhibir el 50% de la actividad metanogénica.
5. La determinación del número más probable mediante el ensayo en placas multipozos permitió estimar la presencia de bacterias capaces de degradar diferentes concentraciones de fenol durante y después de la fase de preexperimentación, lo que indicó la capacidad de estos grupos bacterianos para asimilar y tolerar las variaciones temporales del fenol y la materia orgánica, ya que el método empleado para la determinación se consideró preciso y confiable sobre ambientes anaerobios y bajo la acción de compuestos orgánicos tóxicos asumidos como principal fuente de carbono y energía.
6. Con las siembras sucesivas realizadas durante la fase de experimentación se comprobó que los grupos metanogénicos y sulfatorreductores contenidos en el lodo del RAP son capaces de desarrollarse en ambientes anaerobios, aun siguiendo protocolos de aislamiento para poblaciones aerobias y, por tanto, asimilar, tolerar y degradar compuestos fenólicos en concentraciones de [2,0 ppm] a [10 ppm], en relación con los escenarios más probables generados en el interior del reactor, sin presentar reducciones significativas sobre la respuesta en crecimiento aportada por cada grupo bacteriano.
7. Frente a la evaluación de las eficiencias en remoción –expresadas mediante el crecimiento bacteriano y la reducción en las cargas contaminantes– es posible concluir que la espuma de poliuretano como medio de soporte presenta mayor eficiencia que la guadua *angustifolia*, debido a que presenta mayor porcentaje de porosidad y, por ende, aumenta su propiedad filtrante lo que conlleva a la formación de consorcios bacterianos involucrados directamente con la degradación de compuestos orgánicos, caso contrario a lo obser-

vado en el medio natural, ya que éste posee una superficie con menor porosidad reduciendo así su capacidad filtrante, al conducirse el agua a través de los intersticios del medio y no a través de su superficie, lo que incrementa la cantidad de biomasa activa en suspensión.

8. Los valores estimados para cada una de las relaciones de comportamiento anaerobio propuestas en esta investigación, se fundamentan en la eficiencia en remoción de las cargas contaminantes y su relación con los parámetros de control evaluados a lo largo de la experimentación, para lo que se reportaron rangos de DQO entre 224 y 412 mg/L, para la alcalinidad de 96 a 166 mg/L CaCO_3 y para los AGV de 44 a 66 mg/L de CH_3COOH , con los que se obtuvieron eficiencias cercanas al 80%, presentando como resultado experimental las siguientes relaciones numéricas: $\text{DQO}/\text{alcalinidad} = 2,0 \pm 0,5$ y $\text{DQO}/\text{AGV} = 5,0 \pm 0,5$.
9. A partir de la determinación de COS y COV, se obtuvieron como rangos óptimos para la opera-

ción del reactor, los valores estimados entre 6,2 a 15,3 g DQO/m² – día y ≤ 200 g DQO/m² – día sobre la espuma de poliuretano y la guadua angustifolia respectivamente, en términos de la carga orgánica superficial; por otra parte, los valores obtenidos para la carga orgánica volumétrica oscilan entre 1,5 a 3,0 kg DQO/m³ – día aplicados en el medio de soporte sintético y de 5,0 a 12 kg DQO/m³ – día en el medio de soporte natural, obteniendo de esta forma eficiencias en remoción de la DQO cercanas al 80% y en fenol aproximadamente del 60%.

10. Debido a que durante el tiempo de operación del reactor no se observó formación de biopelícula sobre la superficie de los medios de soporte, se concluye que la formación de ésta se desarrolló sobre los poros interiores, tanto de las piezas de espuma de poliuretano como sobre los discos de guadua *angustifolia*, debido a las variaciones sobre la velocidad del flujo, y por tal motivo la reducción en las cargas orgánicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bayona Gómez, C.E. (1992). *Arranque y operación de un reactor anaerobio a pistón RAP a escala real*. Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Bogotá.
- Buitrón, G. & Torres, A.R. (2002). *Influencia de la variación temporal del sustrato sobre la biodegradación de compuestos tóxicos*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería. Coordinación de Bioprocesos Ambientales, México D.F.
- Cajigas Cerón, Á.A.; Pérez Vidal, A. & Torres Lozada, P. (2005). *Importancia del pH y la alcalinidad en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca*. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería Sanitaria.
- Clesceri, L.S. et ál. (1992). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Madrid: Editorial Díaz Santos.
- Collazos Chávez, C.J. & Díaz Báez, M.C. (2003). Ensayos de biodegradabilidad anaerobia de efluentes cerveceros con lodo granular y lodo floculento. En: *Revista Ingeniería e Investigación*. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, N.º 52, Fasc. 2, pp. 54-62.
- Cookson, J.T. (1995). *Bioremediation Engineering. Design and application*. New York: McGraw-Hill.
- Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (1997). Resolución N.º 1074 Oct. 20 de 1997. *Por el cual se establecen estándares ambientales en materia de vertimientos*. Bogotá, DC.

- Díaz Báez, M.C.; Espitia Vargas, S.E. & Molina Pérez, F. (2002). *Digestión anaerobia, una aproximación a la tecnología*. Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Biotecnología. Bogotá, DC.: Unibiblos.
- Galán Machado, M.C. (1994). *Aislamiento de una nueva cepa biodegradadora del fenol y estudio para su posible uso en un tratamiento de biorremediación*. Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias, Departamento de Ciencias Biológicas, Bogotá, DC.
- García Chaves, M.C. (2003). *Evaluación de la toxicidad del agua residual de una planta cervecera sobre un lodo anaerobio*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Posgrado Interfacultades en Microbiología. Bogotá, D.C.
- Gómez Torres, L.M. (2006). *Biodegradabilidad anaerobia del lixiviado del relleno sanitario Doña Juana*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Maestría en Ingeniería Ambiental. Bogotá, DC.
- González Martínez, S. & Maldonado Orozco, L.E. (2002). *Tratamiento de aguas residuales utilizando biopelículas sobre un material poroso*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Coordinación de Bioprocesos Ambientales, México D.F. III Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancún, México.
- International Standard (1995). ISO 11734 First Edition. Dec. 15, 1995. *Water Quality – Evaluation of the “ultimate anaerobic biodegradability of organic compounds in digested sludge – Method by measurement of the biogas production*.
- Lettinga, G. & Van Haandel, A. (1994). *Anaerobic sewage treatment. A practical guide for regions with a hot climate*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Méndez Hernández, C.A. & Rodríguez Monroy, I.D. (2004). *Análisis comparativo entre medios de soporte fijo de plástico, grava y guadua, en reactores anaerobios de flujo a pistón para el tratamiento de agua residual doméstica*. Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Bogotá, DC.
- Ministerio de Agricultura. Decreto 1594 Jun. 26 de 1984. *Por el cual se reglamenta parcialmente el título I de la Ley 9 de 1979, así como el capítulo II del título VI - parte III - libro II y el título III de la parte III - libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos*. Bogotá, DC.
- Omil, F. et ál. (1997). Desarrollo de biomasa sulfurogénica durante el tratamiento anaerobio de aguas con alto contenido de sulfato en reactores anaerobios de lodos granulares. En: *Revista Afinidad de química teórica y aplicada*. Editada por la Asociación de Químicos del Instituto Químico de Sarria, Tomo LIV, N.º 471.
- Romero Rojas, J.A. (2004). *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Suárez Herrera, M.A. et ál. (2007). *Cultivos bacterianos autóctonos con capacidad de degradar altas concentraciones de fenoles*. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Químicas, México.