

**APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS
EN FILTROS ANAEROBIOS DE FLUJO ASCENDENTE
COMO MEDIOS DE SOPORTE BIOLÓGICO
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

James Rosero Carvajal, jamesro0@hotmail.com

Nelson Rodriguez Valencia, nrodval@gmail.com

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE**

Resumen

Como respuesta ante la problemática ambiental generada por el vertimiento de aguas residuales porcícolas de la granja Botana de la Universidad de Nariño, se implementó y evaluó un conjunto de Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA), tecnología biológica que presentó resultados óptimos en la eliminación de materia orgánica y sólidos presentes en vertimientos tipo pecuario, lo cual depende en gran medida del medio de empaque o de soporte biológico.

Con el fin de evaluar la viabilidad y eficiencia en la implementación de medios de soporte contruidos con materiales reutilizados, se seleccionaron elementos como escombros, residuos de Polietileno Tereftalato (PET), residuos de Polietileno de Baja Densidad (PEBD) y finalmente materiales convencionales como la piedra de rio o canto rodado. Posteriormente se realizó el seguimiento de los filtros mediante la caracterización de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendedos Totales (SST); los resultados indicaron que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las remociones de contaminantes alcanzadas en el efluente de cada filtro y por ende que pueden ser empleados tanto materiales convencionales, como residuos sintéticos de alta porosidad y adecuada área específica. No obstante, debido a la igualdad de varianzas, se consideraron los precios de adquisición y montaje como un criterio de selección importante. Al realizar la comparación de costos de tratamiento, considerando el valor del material de empaque, se puede concluir que los medios no convencionales, son los más económicos.

Palabras clave: Reciclaje de residuos sólidos, Tratamiento de aguas residuales, Filtros anaerobios de flujo ascendente.

Abstract

In response to the environmental problems generated by the discharge of porcine wastewater from the Botana farm's University of Nariño, a set of upflow anaerobic filters was implemented, a technology that presents optimal results in the elimination of organic material and solids from both domestic and livestock wastewater, which depends on the packing bed. In order to evaluate the viability and efficiency of reused materials for this medium, elements such as debris, polyethylene terephthalate (PET) residues, low density polyethylene waste (LDPE) and finally conventional materials such as round stone were selected.

Subsequently, the Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD) and Total Suspended Solids (TSS) were monitored, the results indicated that there were no statistically significant differences between the means of the removals of pollutants reached in the effluent of each filter and therefore that both conventional materials and synthetic residues of high porosity and adequate specific area can be used. However, due to the equality of variances, acquisition and assembly prices were considered as an important selection criterion. When comparing treatment costs, considering the value of the packaging material, it can be concluded that non-conventional means are the most economical.

Key words: Solid waste recycling, wastewater treatment, Anaerobic upflow filters.

Introducción

La ejecución a escala comercial de actividades pecuarias trae consigo grandes retos ambientales (Pérez *et al.*, 2005) pues el tratamiento y disposición de sus residuos ocasionan contaminación de las aguas superficiales y el subsuelo, al aportar significativos niveles de materia orgánica, agentes patógenos y nutrientes (Pinos *et al.*, 2012). Tal es el caso de la granja Botana, donde los

efluentes de la porcicultura se vierten sobre un arroyo superficial, el cual tributa en la quebrada Miraflores, fuente de irrigación para los habitantes de la zona (Corporación Autónoma de Nariño, 2011). Este efluente entra a una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), sin embargo, se requiere un mecanismo de pulimento para dicho vertimiento, pues el tramo de la quebrada donde tributa el arroyo superficial Botana es definido por CORPONARIÑO (2011) como de uso estético-paisajístico con potencialidad agrícola, por lo que los límites permisibles de contaminantes son más exigentes que la resolución 0631/2015, requiriendo tratamientos eficientes en pro del bienestar de los usuarios del cuerpo receptor.

Por lo anterior, se propuso evaluar un sistema piloto de FAFA, ya que esta tecnología es una de las mejores alternativas de pos tratamiento, con altas eficiencias en la remoción de sólidos suspendidos totales (SST) y compuestos orgánicos susceptibles a degradarse por medios biológicos (DBO_5) y químicos (DQO) (Chernicharo, 2007), por la acción de biomasa microbiana adherida a un lecho fijo. El arreglo de los filtros se realizó teniendo en cuenta que Batero y Cruz (2007) destacan que los FAFA incrementan su capacidad de eliminación de contaminantes hasta en un 35% cuando se disponen sucesivamente.

Por otro lado, cabe resaltar que el lecho de soporte o medio filtrante retiene sólidos no solo en forma de biopelícula bacteriana adherida a la superficie de los materiales que lo integran, sino también por suspensión en sus espacios vacíos y en forma de lodos que se ubican debajo de esta zona, asegurando así un efluente clarificado. Sin embargo, el lecho de soporte suele ser grava (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000), material que aumenta el peso del sistema y encarece su construcción (Chernicharo, 2007). Por ello, se propone la introducción de medios de empaque elaborados con residuos reutilizados, materiales de alta disponibilidad y bajos costos que presentan una amplia problemática ambiental, por sus largos periodos de degradación y su inadecuada gestión en el ámbito local (Alcaldía de Pasto, 2007).

A nivel internacional Villanueva *et al.* (2012) evaluaron la eficiencia de lechos de empaque alternativos en 2 FAFAS, para tratar aguas residuales domésticas en Chiapas, México. Los resultados apuntaron que el reactor que usó cáscara de coco como medio filtrante obtuvo una remoción en DQO del 80%, frente al 75% alcanzado por un filtro con lecho de grava. En el ámbito nacional Cárdenas y Ramos (2009) aplicaron esta tecnología para aguas mieles de

trapiches en el municipio de Sandoná, Nariño, donde la concha marina alcanzó las mejores eficiencias de remoción en DQO y DBO₅, del orden de 89,7% y 87,8%, respectivamente, frente a otros elementos como canto rodado, material sintético y vitrificado.

El objetivo de este estudio fue evaluar la eficiencia en remoción de carga orgánica de cada material reutilizado como medio de soporte para los FAFA, en el tratamiento de aguas residuales porcícolas de la granja experimental Botana. Para ello se realizó el diseño y montaje de los reactores teniendo en cuenta las características del afluente, posteriormente se determinaron los porcentajes de remoción obtenidos en el efluente de cada FAFA, en términos de DBO, DQO y SST.

La metodología empleada fue cuantitativa puesto que se basó en la objetividad, evidencia empírica y cuantificación; con un análisis de datos deductivo y estadístico, orientado a la comprobación o falsación del problema formulado. El método tiene un enfoque cuasi-experimental pues produce una manipulación de la variable independiente (el lecho filtrante), para medir su efecto sobre las variables dependientes (Rodríguez y Valledeoriola, 2009).

Desarrollo

Metodología:

Fase I. Diseño de los filtros anaerobios de flujo ascendente.

Visitas de campo y caracterización del afluente. Se efectuaron visitas a la zona estableciendo el sitio óptimo para ubicar los filtros y aforando el caudal por método volumétrico (IDEAM, 2004) en un recipiente graduado de 10 l cada 30 min. Se realizaron muestreos puntuales, durante 2 fechas en el punto previo a la descarga en aguas superficiales durante la hora pico de producción en la zona porcícola. Los parámetros de seguimiento fueron DQO, DBO₅ y SST. Estos dos últimos, esenciales para medir la materia orgánica y estimar la tasa retributiva según el decreto 1076 de 2015.

Índice de Biodegradabilidad. Con los valores de la caracterización se estimó la relación DBO/DQO, determinando qué tan degradable por medios biológicos era dicha agua residual (Bermúdez *et al.*, 2000).

Selección, recolección y adaptación de materiales para el lecho. Según los criterios de Chernicharo (2007), se elaboró una matriz de selección de materiales, obteniendo los que mejor se ajustaran al estudio. Se recolectó dichos materiales en sectores comerciales, residenciales y rurales y se modificó su estructura para optimizar su área específica (Parra, 2006), finalmente se midió su porosidad.

Diseño de los FAFAS. Se diseñaron 4 filtros de medidas iguales donde la única variable independiente fue el material del medio de soporte. El diseño siguió las consideraciones de Romero (2004), MDEC (2000) y Alvarado (2011). Para el caudal de diseño se tuvo en cuenta el tiempo de retención hidráulica (TRH) y el volumen útil, estimado a partir de la porosidad de los materiales del lecho.

Fase II. Implementación del sistema.

Inoculación del material filtrante. Se sometió los materiales a una mezcla con lodos del segundo biodigestor de la PTAR (Torres *et al.*, 2003), en recipientes plásticos con condiciones de invernadero.

Montaje del sistema. Se niveló el terreno y se implementó una estructura de soporte en madera y metal. Los filtros se construyeron en tubos de PVC y se utilizaron tapas plásticas para elaborar el falso fondo. El componente hidráulico se construyó con una bomba sumergible conectada a un tanque de almacenamiento que distribuye el agua a los reactores. Todo el sistema se conectó por medio de mangueras, tubos y accesorios de conexión.

Arranque de los filtros. Se puso en marcha un proceso de adaptación del sistema, caracterizado por la inestabilidad en el rendimiento. Esta etapa se monitoreó con muestreo y análisis de los efluentes.

Fase III. Evaluación de los filtros anaerobios.

Caracterización del efluente. Se determinó una frecuencia y número de muestras por recomendación del laboratorio químico y de aguas UDENAR y en base al presupuesto del estudio. La toma de muestras se realizó después de la preinoculación del lecho, el montaje y la estabilización del sistema. La recolección semanal de muestras puntuales se realizó con instrucciones del laboratorio y el IDEAM (2004). Con los resultados se estableció la eficiencia

de remoción, confrontando las concentraciones de contaminantes en el afluente y en el efluente de cada reactor.

Análisis estadístico. Se estimó la desviación estándar de las eficiencias por cada filtro en el software Excel 2010. Luego se efectuó un análisis de varianzas de un factor ANOVA.

Análisis de precios según el material del medio. Se comparó los promedios de eficiencia en remoción de los contaminantes y de los costos de adquisición por m³ de cada material filtrante, estableciendo el sistema más viable técnica y económicamente.

Resultados

Fase I. Diseño de los filtros.

Visita de campo y caracterización del afluente. Se definió que los filtros irían ubicados a la salida de la PTAR, en la caja de aforo y muestreo final siguiendo las consideraciones de diseño de Batero y Cruz (2007). Por otro lado, el análisis de las muestras de agua residual de la PTAR arrojó lo siguiente:

Tabla 1. Resultados de las jornadas de caracterización y aforo de caudal.

Jornada de muestreo y aforo de caudal	Q (l/s)	Resultados de caracterización (mg/l)			Valores (mg/l)			límite Resolución Objetivos calidad Q.Miraflores (mg/l)	
		DBO ₅	DQO	SST	DBO ₅	DQO	SST	DBO ₅	SST
1	0,12	203,58	415	37					
2	0,11	257,51	725,7	80					
Promedio	0,115	230,54	570,3	70	450	900	200	3	5

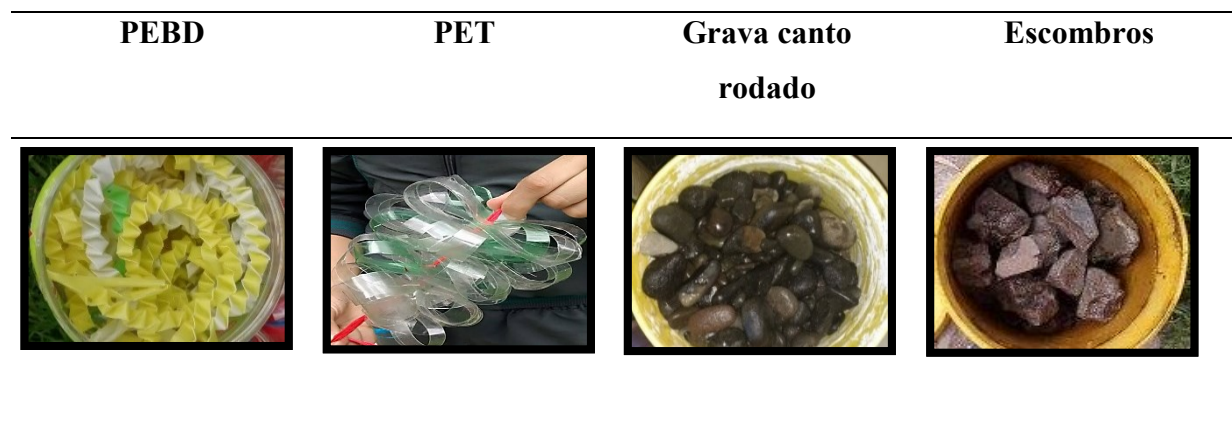
La Tabla 1 indica que los vertimientos cumplen con los niveles permitidos por la Resolución 0631/2015 para descargas de la cría de porcinos (MADS, 2015), pero se alejan de los requeridos

por los objetivos de calidad del cuerpo receptor quebrada Miraflores (CORPONARIÑO, 2011), siendo no aptos para el uso estético-paisajístico con potencialidad agrícola al que están destinados.

Índice de biodegradabilidad: La relación DBO/DQO fue de 0,4, valor que indica que el vertimiento es degradable por métodos biológicos y en especial por un proceso anaerobio (Bermúdez *et al.*, 2000), siendo los FAFAS propuestos, pertinentes en este punto.

Selección, recolección y adaptación de materiales para lecho filtrante: Los elementos definidos para el medio fueron grava de canto rodado, escombros y residuos de Polietileno de Baja Densidad (PEBD) y Polietileno Tereftalato (PET) como se observa en la figura 1, estos materiales cumplen con las recomendaciones de Chernicharo (2007), puesto que son biológica y químicamente inertes, resisten el desgaste y las fuerzas mecánicas y presentan elevadas porosidades, del orden de 40%, 67%, 74% y 76%, respectivamente. Cabe resaltar que el PEBD, PET y los escombros son abundantes y de bajo costo, a diferencia de la piedra que incrementa la inversión inicial. La forma de dichos elementos fue modificada para aumentar el área de contacto y los espacios intersticiales útiles para el desarrollo de la biopelícula.

Figura 1. Materiales de lechos filtrantes.



Como lo evidencia la Figura 1, todos los materiales alternativos al tradicional son residuos, pues según la Resolución 0330/2017, este tipo de obras deberán propender por utilizar materiales reutilizables y/o reciclables (Ministerio de Vivienda, 2017).

Diseño de los FFAFA. Mediante procedimientos establecidos por el RAS 2000, Romero (2004) y Alvarado (2011), se obtuvieron los datos consignados en la Tabla 2.

Tabla 2. Dimensiones y parámetros de diseño de Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.

Filtro	Caudal de diseño (l/h)	Volumen útil (l)	Volumen filtros (l)	Altura total (m)	Altura del medio (m)	TRH (h)
PEBD	2,3	12,1				
Grava canto rodado	1,2	6,6	16	1,35	0,9	5,25
PET	2,4	12,5				
Escombros	2,1	11				

Dado que el caudal se estimó a partir del volumen útil, utilizando la porosidad (Mendez, *et al.*, 2007), la grava de canto rodado presenta un caudal de diseño bajo en comparación con los demás reactores como se evidencia en la Tabla 2, ya que es el material menos poroso. La Figura 2 muestra el diseño estándar propuesto para todos los filtros:

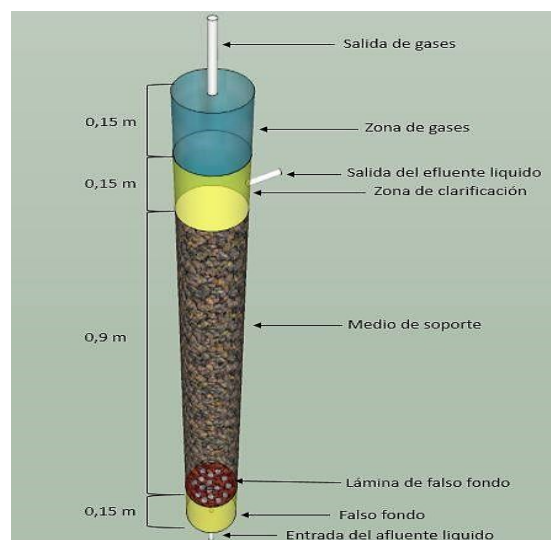


Figura 2. Esquema de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.

Como lo indica la Figura 2, se destinó una zona de falso fondo para propiciar un espacio libre de relleno que evacue los lodos que puedan producirse en el tratamiento, ya que el material filtrante no es uniforme (Castaño, 2003 citado en Batero y Cruz, 2007), la altura del medio ocupa el 66,6% de la altura total, de acuerdo a Romero (2004) que recomienda que la altura del medio debe estar entre un 50 al 70% del total.

Fase II. Implementación del sistema.

Inoculación del material filtrante. Este procedimiento se realizó durante de 21 días, al final de los cuales se observó la formación de una biopelícula bacteriana alrededor de los elementos del lecho de acuerdo a Torres *et al.* (2003).

Montaje del sistema. El armazón de los reactores se realizó en tubos de PVC de 6", ubicados sobre un soporte de madera y metal. El componente hidráulico consta de una bomba sumergible ubicada en la sección de agua clarificada del FAFA existente en la PTAR. Este dispositivo aseguró el flujo constante del agua hacia un tanque de almacenamiento elevado de 1000 l, que distribuía por gravedad el caudal afluente. La red de distribución se elaboró con manguera de 1" y tubo de PVC de 1/2" con sus respectivos accesorios. Para la evacuación del biogás se instaló una válvula de alivio en la parte superior de los filtros, que permitió conservar las condiciones anaerobias de los reactores. Una vez montado el sistema se depositó el lecho de soporte y se selló herméticamente mediante tapones de 6" como se observa en la Figura 3; a continuación los filtros fueron puestos en marcha, dando inicio a la fase de arranque.



Figura 3. Montaje del sistema de filtros.

Fase III. Evaluación de los filtros anaerobios.

Caracterización del efluente. El análisis de las muestras obtenidas en el agua residual procedente de los filtros presentó los resultados consignados en las Figuras 4, 5 y 6.

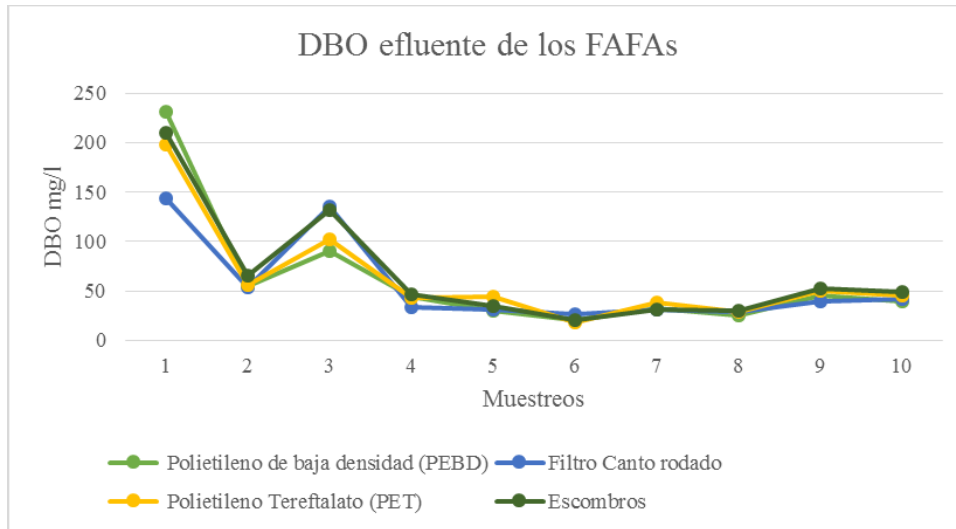


Figura 4. Concentración de DBO₅ en el efluente de los filtros a través del tiempo.

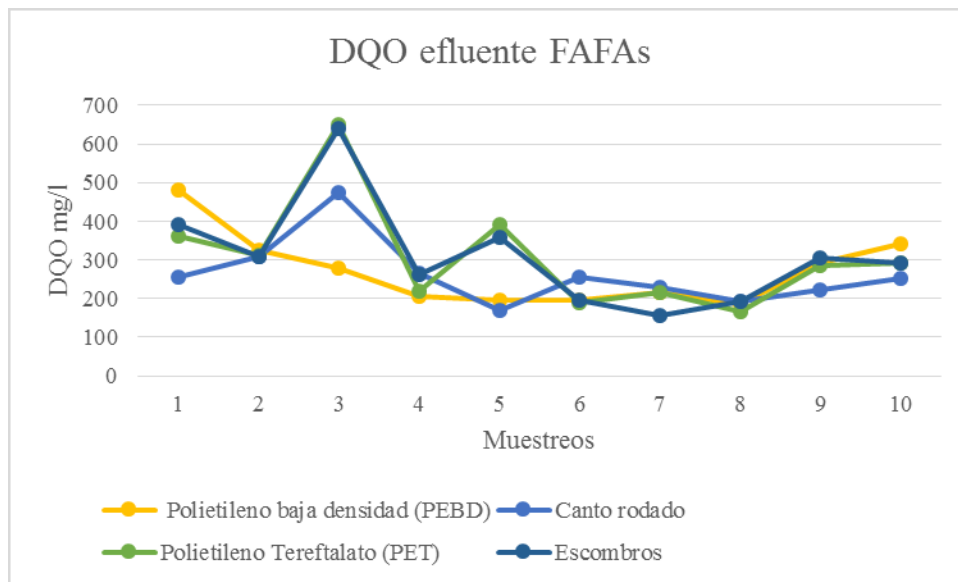
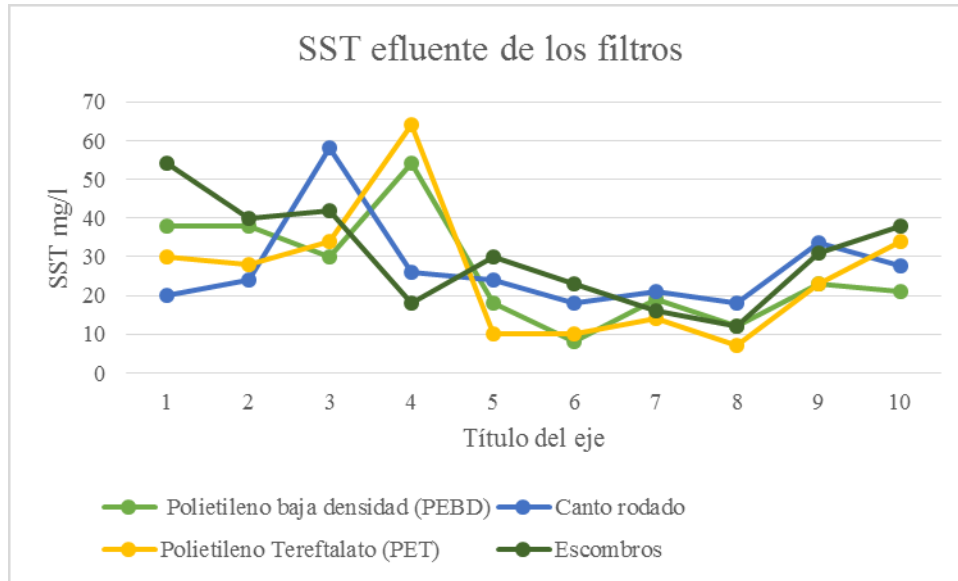


Figura 5. Concentración de DQO en el efluente de los filtros a través del tiempo.



CONCENTRACIÓN DE SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES VS TIEMPO

Figura 6. Concentración de SST durante las semanas de muestreo evaluadas.

La concentración de los 3 parámetros en los reactores presentó fluctuaciones regulares, principalmente en las semanas iniciales de muestreo. Cabe resaltar que esta fluctuación se minimiza gracias al proceso previo de inoculación y estabilización realizado, que según Chernicharo (2007) mejora la eficiencia y competitividad del sistema en menor tiempo. Aún con la baja temperatura de la zona, que dificulta la degradación anaerobia, el arranque fue óptimo gracias a la utilización de los lodos granulares como inóculo, tal y como ocurre en la investigación de Cubillos (2006), Batero y Cruz (2007) y Padilla (2010), que utilizan lodos de sistemas ya arrancados, adaptados a los sustratos del agua residual y con una alta actividad metanogénica. (Torres *et al.*, 2007).

La Tabla 3 sintetiza los promedios de remoción de cada filtro durante la etapa de operación normal:

Tabla 3. Promedios de remoción materia orgánica y suspendida en estabilización.

	% Remoción											
	Polietileno baja densidad (PEBD)			Canto rodado			Polietileno Tereftalato (PET)			Escombros		
	DBO	DQO	SST	DBO	DQO	SST	DBO	DQO	SST	DBO	DQO	SST
	2,64	11,48	30,91	39,53	52,66	63,64	16,84	33,61	45,45	11,76	28,07	1,82
	76,09	42,89	11,63	76,86	45,82	44,19	75,62	45,24	34,88	71,61	45,82	6,98
	66,52	57,16	55,88	49,62	26,96	14,71	62,11	0,36	50,00	51,06	1,89	38,24
	79,62	63,75	16,92	84,63	53,18	60,00	80,39	61,41	1,54	78,80	54,06	72,31
	88,42	67,32	74,65	87,74	71,78	66,20	83,14	34,48	85,92	86,52	40,04	57,75
	91,29	64,90	88,06	88,88	54,14	73,13	92,32	66,10	85,07	91,39	64,90	65,67
	84,44	58,78	75,95	85,04	56,24	73,42	81,34	58,78	82,28	84,69	70,25	79,75
	88,35	66,93	84,00	86,50	65,75	76,00	86,55	70,49	90,67	86,10	65,75	84,00
	79,78	51,18	55,77	82,61	62,87	35,58	77,76	52,28	55,77	76,67	48,94	40,38
	84,38	44,18	65,57	83,19	58,86	54,92	82,00	52,33	44,26	80,55	52,33	37,70
Máximo	91,29	67,32	88,06	88,88	71,78	76,00	92,32	70,49	90,67	91,39	70,25	84,00
Mínimo	2,64	11,48	11,63	39,53	26,96	14,71	16,84	0,36	1,54	11,76	1,89	1,82
Promedio	74,15	52,86	55,93	76,46	54,83	56,18	73,81	47,51	57,58	71,92	47,21	48,46
Desviación E	26,13	17,04	27,44	17,29	12,27	19,54	21,50	20,63	28,49	23,93	20,38	28,63
Varianza	682,98	290,46	752,74	298,93	150,54	382,00	462,34	425,72	811,61	572,79	415,19	819,43

La Tabla 3 indica que en la operación normal todos los filtros alcanzaron un promedio de remoción en DBO₅ dentro del rango de eficiencia de 65 a 80%, recomendado por Romero (2004) y la Resolución 0330 del Ministerio de Vivienda (2017), superando resultados de investigaciones similares como la de Alvarado (2011) en Costa Rica, donde se comparó la piedra tradicional con materiales alternativos como medios filtrantes, obteniéndose que los plásticos presentaron remociones entre 31,97% y 42,06%. Las concentraciones obtenidas por el PEBD y la grava son similares a las resultantes de la investigación Cárdenas y Ramos (2009) en Sandoná – Nariño para tratar aguas mieles, donde la concha marina y los elementos sintéticos lograron remociones de DBO₅ de 87,8%.

De este modo, las mayores remociones en DBO₅ fueron obtenidas por los filtros con PET y grava de canto rodado, siendo el plástico una alternativa óptima para el tratamiento, ya que logró una remoción mayor a la de la piedra y posee una densidad menor, siendo más liviano y flexible sin perder su resistencia, mientras que el medio tradicional afecta tanto el costo, como la necesidad de resistencia en las estructuras, (Castaño y Paredes, 2002). Además, la porosidad del canto rodado es casi la mitad de la del PEBD, permitiendo este último mayores espacios intersticiales, mejor distribución del flujo y menores probabilidades de colmatación, problema muy común en los filtros tradicionales (Batero y Cruz, 2007). Existen casos similares como el estudio de Castaño y Paredes (2002), que comparó medios en piedra y aros de guadua, obteniendo que los aros, al igual que el PEBD evaluado en este estudio, por su porosidad y

densidad son menos susceptibles a taponamientos, sin embargo, la guadua por ser un material orgánico es propensa a degradación con el tiempo, mientras que el PEBD al ser inerte, tiene mayor durabilidad.

Por otro lado, la temperatura promedio reportada en la estación agro-meteorológica del IDEAM, localizada en Botana, tuvo un valor promedio de 13,81°C en los meses de operación, muy por debajo de la temperatura óptima descrita por la mayoría de autores. Acosta y Obaya (2005) indican que el tratamiento anaerobio opera bien a temperaturas mayores a 20°C, que aceleran la velocidad de degradación de materia orgánica. Sin embargo, en general la remoción de DBO₅ a temperaturas menores a 20° fue significativa; otros autores como Gonçalves *et al.* (2001) indican que se han presentado casos donde los filtros operan en rangos inferiores a 20°C obteniendo resultados óptimos, especialmente cuando estas estructuras se emplean como post-tratamiento de tanques sépticos y reactores UASB (citado en Chernicharo, 2007).

Lo anterior no quiere decir que esta variable no sea importante para el desempeño del tratamiento, pues cabe señalar que para la semana 6 todos los filtros alcanzaron el mayor porcentaje de remoción de DBO₅ (Tabla 3), lo que puede deberse a que la temperatura ambiente en la fecha de muestreo alcanzó los 14,9°C, la segunda más alta de los días de muestreo.

Para el caso de la DQO, la Figura 5 indica que la concentración en todos los filtros tuvo un comportamiento más variable en comparación con la DBO₅ (Figura 4). Según la Tabla 3, en operación normal, el promedio de eficiencia en remoción de DQO, fue casi la mitad del promedio removido en DBO₅ y aunque la desviación estándar fue menor, se presentaron fluctuaciones que muestran mayor inestabilidad en la remoción de este parámetro. Al igual que con la DBO₅ los filtros con piedra y PET alcanzaron los mayores valores en remoción de DQO, sin embargo los valores no superan el 54% en promedio, esto se puede deber a que por sus características, el objetivo del filtro biológico es remover principalmente materia orgánica en términos de DBO₅. Area *et al.* (2010) indican que para cargas contaminantes de DQO, por más eficiente que sea el tratamiento, no alcanza para llegar a los niveles requeridos por sí solo, por lo que se requiere una combinación de tratamientos avanzados.

Lo anterior, ocurre a raíz de que si bien la DQO de un agua residual contiene una fracción de sustratos biodegradables (DQO_{BD}), que se transforman en metano y lodos, también contiene una

fracción no biodegradable conocida como DQO recalcitrante o biológicamente resistente (DQO_{Rec}), la cual contiene sustratos complejos que los microorganismos fermentativos no pueden degradar, debido a que la biomasa del filtro aún no se adapta para su desdoblamiento, o porque los sustratos pueden ser biológicamente inertes, así, la DQO_{Rec} no es fermentada y permanece biológicamente inalterada en el efluente (Bermúdez, 2000). Según lo anterior, es posible aseverar que con el transcurso del tiempo se genere una adecuación más óptima de la biomasa en los filtros y la remoción de DQO aumente.

Cabe resaltar, que existen investigaciones con TRH mayores a 1 día, que han logrado eficiencias en DQO mayores a las de este estudio, tal es el caso Alvarado (2011), quien reportó promedios de eficiencia de 69,28% para filtros con medio de soporte en piedra y 72,95% para medios plásticos, igualmente en el estudio de Villanueva *et al.* (2012) se logró una remoción de 75% en DQO para reactores con materiales de fibra de coco y grava, por su parte, Cárdenas y Ramos (2009) reportan una remoción de DQO de 87,7% en la utilización de medios sintéticos y conchas marinas.

Para el caso de los SST, la Tabla 3 indica que el filtro con lecho de escombros presentó la menor eficiencia en remoción, debido a que el residuo de construcción utilizado contenía remanentes de ladrillo, elemento que desprende fácilmente material particulado, de modo que los sustratos finos de arcillas y silicatos, tienden a ser arrastrados con el fluido que entra al medio poroso, pudiendo ocasionar colmatación o disminución de la eficiencia en remoción (Area *et al.*, 2010). A pesar de ello, cuando el sistema se estabiliza, los microorganismos se inmovilizan mediante la adhesión al escombros. Por otro lado, los promedios de eficiencias en remoción de SST alcanzaron niveles significativos, para los reactores con lechos de PET y PEBD, demostrando que los medios con materiales plásticos pueden alcanzar eficiencias mayores al 60%, valor recomendado por Chernicharo (2007) y el Ministerio de Vivienda (2017).

Según Batero y Cruz (2007) estos sistemas presentan una retención de biomasa media-alta, sin embargo, cabe resaltar que los sólidos que ingresaron en los reactores eran de diámetros muy finos, ya que las aguas residuales se trataron previamente en procesos de sedimentación partículas de mayor tamaño. Por ello, estos elementos pueden no ser retenidos en el medio de empaque, debido a que los materiales de contacto para FAFAS generalmente presentan alta

porosidad con el fin de evitar colmatación y propiciar la formación del biofilm (Torres *et al.*; 2003). Por otra parte, si se pretende optimizar la retención de sólidos, se debe implementar un tratamiento físico que comprenda un medio filtrante con poca porosidad como la arena, ampliamente utilizada para remover pequeñas partículas de sólidos en vertimientos.

Análisis estadístico. Tal y como destacan Bakieva, González y Jornet (2012), el análisis de varianza ANOVA de un factor es útil para establecer la relación que tiene la variable dependiente o factor (X), sobre una variable independiente (Y) de interés, esto mediante el contraste de igualdad de medias de tres o más poblaciones independientes con menos de 50 datos. Se decidió realizar este test mediante el análisis de datos de un factor existente como complemento en el software Excel. Además, se comprobó como requerimiento el supuesto de la independencia de los datos (Bakieva et al, 2010), por lo cual se puede afirmar que como los datos obtenidos para determinar la concentración de los parámetros evaluados en el efluente de cada filtro, provienen de diferentes muestras, elaboradas en intervalos semanales, comprobándose así dicha independencia de las observaciones.

Los resultados direccionaron la aceptación de la hipótesis nula, la cual establece que no se presenta una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las remociones de contaminantes alcanzadas en el efluente de cada filtro (Chaux y Zambrano, 2011), y por ende pueden ser empleados tanto materiales convencionales, como residuos sintéticos de alta porosidad y adecuada área específica, puesto que se obtienen resultados similares. No obstante, debido a la igualdad de varianzas, se consideraron los precios de adquisición y montaje como un criterio de selección importante.

Análisis de precios según el material del medio. La Tabla 4 muestra que los filtros con PEBD y PET son las mejores opciones para disminuir los niveles de DBO₅, DQO y SST pues además de ser eficientes en remoción de materia orgánica, disminuyen los costos en la construcción de estos tratamientos y se encuentran ampliamente disponibles. Cabe resaltar, que es recomendable evaluar también las inversiones en mantenimiento a mediano y largo plazo, en especial en circunstancias de taponamiento para los filtros en piedra y las que podrían presentar los demás materiales, además de evaluar su durabilidad, estos valores no se consideraron puesto que no existen costos establecidos para los medios alternativos utilizados que apenas se están evaluando en este modelo piloto (Castaño y Paredes, 2002).

Tabla 4. Comparación de costos y eficiencias para materiales del medio de empaque.

Material del medio de empaque	Costo estimado (\$COP) de adquisición por m ³	Porcentaje de eficiencia de remoción en la etapa de operación normal (temperatura inferior a 20°C)		
		DBO ₅	DQO	SST
Canto rodado	82.000	76,46	54,83	56,18
Escombros (Con adecuación de partícula)	25.000	71,92	47,21	48,46
Polietileno Tereftalato (PET) reutilizado (Con adecuación de tamaño)	35.000	73,81	47,51	57,58
Polietileno de Baja Densidad (PEBD) Reutilizado (con adecuación de forma)	40.000	74,15	52,86	55,93

Conclusión

- Los filtros anaerobios de flujo ascendente con medio de soporte elaborado a partir de estructuras de canto rodado y Polietileno Terftalato, alcanzaron mayores eficiencias en la remoción de DBO₅ y SST, debido a la alta porosidad y a su diseño estructural que permitieron una mayor área de contacto y una mejor distribución del flujo.
- Los filtros anaerobios de flujo ascendente requieren de tratamientos previos para la remoción primaria y secundaria de sólidos y carga orgánica con el fin de garantizar su eficiencia y evitar problemas por colmatación o sobrecarga de material biológico.
- Se demostró que este tipo de sistemas también son factibles para el tratamiento de aguas residuales a temperaturas menores a 20°C, cabe resaltar que si bien no se alcanzan las remociones obtenidas a temperaturas superiores, la eficiencia es positiva.

- El filtro que contenía lecho filtrante elaborado con escombros obtuvo las menores remociones en SST dado que sus materiales presentaron posiblemente desprendimiento de partículas al entrar en contacto con el agua residual, por lo que se requirió mayor tiempo de arranque para alcanzar un estado más estable.
- Todos los filtros presentaron mayores fluctuaciones y bajas eficiencias en remoción de DQO, dado que el agua residual contiene sustratos resistentes a la degradación que requieren mayor adaptación de los microorganismos, o tratamientos posteriores para ser depurados.
- Se logró alcanzar la etapa de estabilización gracias al proceso previo de inoculación del medio filtrante que fue indispensable para acelerar la etapa de arranque permitiendo que las bacterias se adecuen de manera eficaz a los materiales de soporte.
- Los resultados mostraron que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las remociones de contaminantes alcanzadas en el efluente de cada filtro y por ende que pueden ser empleados tanto materiales convencionales, como residuos sintéticos de alta porosidad y adecuada área específica como materiales de empaque.
- Al realizar la comparación de costos de tratamiento, considerando el valor del material de empaque, se puede concluir que los medios no convencionales, son los más económicos.
- La comparación de precios evidencia que las estructuras realizadas con PEBD y PET constituyen las mejores opciones para disminuir los niveles de DBO₅, DQO y SST puesto que además de ser eficientes en la remoción de materia orgánica, disminuyen los costos en la construcción de este tipo de tratamientos anaerobios, y se encuentran ampliamente disponibles en zonas residenciales, comerciales y rurales debido a que son residuos desaprovechados que carecen de una buena gestión en el ámbito local.

Referencias

- Area, M., Ojeda, S., Barboza, O., Bengoechea, D., & Felissia, F. (2010). Tratamientos aplicables para la reducción de la DQO recalcitrante de efluentes de pulpos quimimécánicos y semiquímicos (revisión). *Revista de Ciencia y Tecnología*(13). Recuperado el 26 de Septiembre de 2017, de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-75872010000100001
- Alvarado, A. (2011). *Evaluación de materiales de desecho como medio filtrante en ltrros anaerobios de flujo ascendente*. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica .
- Argote, L., y Arteaga, N. (2017). *Primer informe semestre práctico Granja Experimental Botana*. Pasto: Universidad de Nariño.
- Asociación Colombiana de Porcicultores. (2002). Guía ambiental para el subsector porcícola. Recuperado de http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias_Ambientales/Gu%C3%ADas%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/AGRICOLA%20Y%20PECUARIO/Gu%C3%ADa%20Ambiental%20para%20el%20subsector%20Porc%C3%ADcola.pdf
- Bakieva, M., González, J., Jornet, J. (2012). SPSS: ANOVA de un Factor. InnovaMIDE, Grupo de Innovación Educativa. Universidad de Valencia. España.
- Batero, Y., & Cruz, E. (2007). *Evaluación de filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) con medio de soporte en guadua para la remoción de materia orgánica de agua residual sintética*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Bermúdez, R., Hoyos, J., Rodríguez, S. (2000). *Evaluación de la disminución de la carga contaminante de la vinaza de destilería por tratamiento anaerobio*. Rev. Internacional de Contaminación Ambiental. 16(3): 103-107.
- Campos, E., Elias, X., & Flotats, X. (2012). *Procesos biológicos, la digestión anaerobia y el compostaje*. Madrid: Diaz de Santos. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Elena_Campos/publication/304771327_Procesos_biologicos_La_digestion_anaerobia_y_el_compostaje/links/577a075e08ae4645d611f5f7/Procesos-biologicos-La-digestion-anaerobia-y-el-compostaje.pdf
- Cárdenas, G., & Ramos, R. (2009). Scielo.org. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0124-81702009000100002&script=sci_arttext.

- Casierra, H., Casalins, J., Vargas, X., & Caselles, A. (2016). Desinfección de agua residual doméstica mediante un sistema de tratamiento acoplado con fines de reúso. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(4), 97-111. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000400097&lang=pt
- Chaux, G., Zambrano, N. (2011). Tratamiento de aguas residuales mediante reactores anaerobios de placas verticales paralelas en acrílico. *Rev. Bio. Agro.* 9(2): 159-169.
- Chernicharo, C. A. (2007). Principios de tratamiento biológico de aguas residuales, 5(1). Belo Horizonte, Brasil: Iwa Publishing
- Comisión nacional del agua. (2015). *Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Filtros Anaerobios de flujo ascendente*. Mexico: Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. Recuperado de <http://www.mapasconagua.net/libros/SGAPDS-1-15-Libro29.pdf>
- Consejo nacional de política económica y social. (21 de Noviembre de 2016). CONPES 3874 Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos . Bogotá, Colombia . Recuperado de <http://www.andi.com.co/Ambiental/SiteAssets/Paginas/default/CONPES%203874.pdf>
- Corporación Autónoma de Nariño. (2011). *Plan de Ordenamiento del Recurso Hidrico Quebrada Miraflores*. Pasto. Recuperado de <http://corponarino.gov.co/expedientes/descontaminacion/porhmirafloresp1.pdf>
- Corrales, L., Antolinez, D. M., Bohórquez, J. A., & Corredor, A. M. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Revista NOVA*, 13(23), 55-81. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/nova/v13n24/v13n24a06.pdf>
- Cubillos, H. (2006). *Puesta en marcha y evaluación de un reactor anaerobio de flujo a pistón para el manejo de lixiviados del relleno sanitario de Villavicencio "Don Juanito"*. (Tesis de pregrado). Bogotá. Recuperado de <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14909/T41.06%20C891p.pdf?sequence=1>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. (06 de Septiembre de 2007). *dane.gov.co*. Recuperado de

https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/solidos_suspension.pdf

- Díaz, E., Alvarado, A. R., y Camacho, K. E. (2012). *El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, Mexico. Quivera*, 14(0) 78-79 Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/401/40123894005.pdf>
- Drucker, A., Escalante, R., Gómez, V., y Magaña, S. (2004). La Industria Porcina en Yucatán: un análisis de la generación de aguas residuales. *Problemas del Desarrollo* 34(135), 10-12.
- FAO. (2011). *Manual del biogas*. Santiago de Chile. Recuperado de www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf
- Ferro, A. (2012). *Evaluación de sostenibilidad del sistema de tratamiento de aguas residuales del corregimiento de Felidia zona rural del municipio de Santiago de Cali*. (Tesis de pregrado) Recuperado de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7674/1/3750-0446267.pdf>
- Frías, C.; Ize, I.; Gavilán, A. 2003. La situación de los envases de plástico en México. *Gaceta ecológica*. 69(1): 67-82.
- Garzón, M. y Buelna, G. Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México. *Revista Internacional de contaminación ambiental*, 30(1), 65-79. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/370/37029961006.pdf>.
- Guaman, V., y Molina M. (2015). *Evaluación de las plantas de depuración de agua residual de las comunidades de Macas y San Pedro, Cantón Cuenca, Azuay*. (Tesis de pregrado). Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/21662/1/TESIS.pdf>
- INSAGE . (2017). *Gestión del Riesgo y Evaluación Ambiental del Vertimiento* . Pasto .
- Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales. (2004). Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. Recuperado de: http://corponor.gov.co/corponor/sigescor2010/TRAMITESYSERVICIOS/Guia_monitor_eo_IDEAM.pdf
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. (1998). *GTC 53-2. Gestión Ambiental. Residuos Sólidos. Guía para el aprovechamiento de los residuos plásticos*. Recuperado de <http://www.bogotaturismo.gov.co/sites/intranet.bogotaturismo.gov.co/files/GTC%2024%20DE%202009.pdf>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. (1995). *NTC-ISO 5667-2. Gestión ambiental. Calidad del agua. Guía general para la conservación y manejo de muestras.*

INSUMOS AMBIENTALES SAS. (2015). Recuperado de <http://www.insumosambientales.com/index.php/servicios/filtros-sedimentales-y-disposicion-final>

interapas.gob.mx. (s.f.). Recuperado de http://www.interapas.gob.mx/Cultura/folletos/sistema_de_tratamiento_de_aguas_residuales.pdf

Jarauta, L. (2005). *Digestión anaerobia para el tratamiento de residuos orgánicos: estudio de las necesidades para la implantación en Perú.* Universidad Politécnica de Catalunya. Recuperado de <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/2716/36244?sequence=2>

Knobelsdorf Miranda, J. (2005). *Eliminación biológica de nutrientes en un ARU de baja carga orgánica mediante el proceso VIP.* Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya . Recuperado el 24 de Septiembre de 2017, de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93224/12Mjkm12de18.pdf>

Laboratorio de analisis quimico y aguas Universidad de Nariño. (2014). *Informe de caracterización de vertimientos líquidos Granja Botana-Universidad de Nariño.* Pasto .

Lozano, E., & Dapena, J. (1995). *Tratamiento biológico de las aguas residuales;*. Díaz de Santos. Recuperado el de [http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Medida_ontaminacion_organica.pdf](http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Medida_contaminacion_organica.pdf)

Maita, J. (2012). *Dimensionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales para la cabecera parroquial de Licán* (Tesis de pregrado). Riobamba. Recuperado de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2010/1/236T0062.pdf>

Martínez, M., Murcia, D., & Suárez, Y. (2017). *Evaluación de un sistema de biorremediación de aguas residuales porcícolas en la finca El Porvenir, vereda Suncunchoque, sector La Laja, Ubate – Cundinamarca, y su reutilización con fines agroambientales.* (Tesis de pregrado). Recuperado de:

- http://repository.uniminuto.edu:8080/xmlui/bitstream/handle/10656/3339/TIAG_MartinezRomeroMacol_2015.pdf?sequence=1
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. (17 de Marzo de 2015). *lasalle.edu.co*. Bogotá. Recuperado de <http://www.lasalle.edu.co/wps/wcm/connect/7bf35b9e-b9ac-45b3-a280-c7dec8b1499d/Resolucion+631-2015.pdf?MOD=AJPERES>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (17 de Marzo de 2015). *www.acoplasticos.org*. Bogotá. Recuperado de http://www.acoplasticos.org/acceso_clientes/imagenes/Resolucion%20Vertimientos%20631%202015.pdf
- Ministerio de Desarrollo Económico. (Noviembre de 2000). *cra.gov.co*. Bogotá. Obtenido de http://cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/7._Tratamiento_de_aguas_residuales.pdf
- Ministerio de vivienda. (8 de Junio de 2017). *minvivienda.gov.co*. Recuperado de <http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/0330%20-%202017.pdf>
- Municipio de Pasto. (2007). *Plan de gestión integral de residuos sólidos 2007-2022*. Recuperado de: *www.pasto.gov.co*
- Mora, A., Chávez, C., Fonseca, G., Cabra, J., & Carmona, Y. (2005). Desarrollo de un inóculo microbiano empleando lodos activados para la remoción de ácido sulfhídrico (H₂S) mediante biofiltración. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 7(2), 26-34.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (20 de Noviembre de 2006). *www.fao.org*. Recuperado de <http://www.fao.org/Newsroom/es/news/2006/1000448/index.html>
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA. (Abril de 2014). *Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales*. Lima: OEFA. Recuperado de https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827
- Orjuela, M., Lizarazo, J. (2013). *Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/11112/1/marthaisabelorjuela2013.pdf>
- Pacheco, J., & Magaña, A. (2003). Arranque de un reactor anaerobio. *Ingeniería*, 7(1), 21-25. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/unam7/arranque.pdf>

- Pérez, T; Pérez, J; Ravelo, D. (2005). Qué podemos hacer los productores del sector pecuario a favor del medio ambiente. *Revista Gestión y Ambiente*, vol. 8(1), p. 147-150.
- Parra, L. (2006). *Operación de un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) hasta alcanzar el estado estable* (Tesis de pregrado). Manizales: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/1178/1/linamarcelaparrarodriguez.2006.pdf>
- Pinos, J., García, J., Peña, L., Rendón, J., González, C., y Tristán, F. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Agrociencia* 46 (4) , 359-370.
- Rodríguez, J. (2002). *Arranque y operación de reactores anaerobios*. Cali. Recuperado de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/arranque.pdf>
- Rodríguez, D.; Valldeoriola, J. 2009. Metodología de la investigación. Universitat Oberta de Catalunya. Cataluña, España. 80 p.
- Romero, J. (2004). Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Salazar, R. (1999). Fundamentos de los tratamientos anaerobios. Pasto, Colombia. Universidad de Nariño – Facultad de Ingeniería. 54-55.
- Salgado, D. (2010). Diseño de experimentos. Ibagué, Colombia. Recuperado de: http://www.estadisticacondago.com/images/estadistica_inferencial/apuntes%20de%20dise%C3%B1o%20de%20experimentos.PDF
- Sánchez, M. A., Peón, I. E., Cardona, T., Ortega, L., & Urriolagoitia, G. (2016). Evaluación inicial de parámetros de campo en un biodigestor anaeróbico para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(1), 173-184. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77645907018>
- Serrano, H. (2005). *Evaluación ambiental y sanitaria de dos sistemas individuales de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante la construcción de prototipos a escala natural* (Tesis de pregrado). Recuperado de <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/929/1/26180.pdf>
- Suarez, L. (2011). *Tratamiento de aguas residuales municipales en el Valle del Cauca*. (Tesis de maestría) Santiago de Cali. Universidad del Valle. Recuperado de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/10174/1/7720-0445526.pdf>

Téllez, A. (2012). La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: Una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

TL INGEAMBIENTE. (2016). Recuperado de <http://www.tlingeambiente.com/servicios/roseton-para-tratamiento-de-aguas-residuales/>

Torres, P., Pérez, A., Cajigas, A., Jurado, C. y Ortiz, N. (2007). Selección de inóculos para el tratamiento anaerobio de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 6(1), 105-111. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/2311/231120826010.pdf>

Universidad de Nariño. (2016). *udenar.edu.co*. Pasto. Recuperado de <http://www2.udenar.edu.co/project/granja-experimental-botana/>

Vásquez, G. d. (2013). *Panorama del tratamiento de aguas residuales con tecnología anaerobia en la Costa Atlántica Colombiana*. (Tesis de maestría) Bogotá. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/49437/1/panorama%20del%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20con%20tecnologia%20anaerobia%20en%20la%20costa%20atlantica%20colombiana.pdf>

Villegas, M., & Vidal, E. (2009). *Gestión de los procesos de descontaminación de aguas*. Medellín. Recuperado de <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/55/1/GestionProcesosDescontaminacion.pdf>

Villamil, C., Duque, C., & Caicedo, L. (2000). *Sistemas de tratamiento para los residuos de la industria porcícola*. Bogotá: Asociación Colombiana de Porcicultores.

Zapata, N., Hernández, M. L., & Oliveros, E. F. (s.f). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Manizales. Recuperado de http://www.institutodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion_digital/Agua_Servicio_Publico/Tratamiento_Aguas_Residuales-Zapata_N.pdf