

## **Evaluación de remoción de carga contaminante con sistema piloto para tratamiento de aguas residuales domésticas**

Evaluation of contaminant load removal with pilot system for domestic wastewater treatment

**Andres Felipe Pasaje T.<sup>1</sup>; Catherine Natali Palacios O.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Estudiante para optar título de pregrado Ingeniero Ambiental, Facultad de Ciencias Agrícolas, Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia, andresfpasaje@gmail.com.

<sup>2</sup>Estudiante para optar título de pregrado Ingeniero Ambiental, Facultad de Ciencias Agrícolas, Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia, nahali-1313@hotmail.com

### **RESUMEN**

En Colombia, debido al escaso tratamiento de vertimientos generados por diversas actividades, se han producido en forma sucesiva e incremental, problemas de salubridad y de calidad del agua en varias regiones. Una solución a esta problemática ha sido la construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales (STAR), según el Ministerio de Ambiente (2014) existen actualmente 237 STAR construidas en 235 municipios, lo que representa el 21,7 % de los municipios del país. En el departamento de Nariño, considerando su población de 64 municipios en el 2005, se estimó que el vertimiento incontrolado de las aguas residuales domésticas aporta una carga contaminante de 113,66 ton/día de DQO, 71,04 ton/día de DBO<sub>5</sub> y 106,55 ton/día en sólidos suspendidos, cuyo efecto principal es la contaminación del suelo, atmósfera y aguas superficiales y subterráneas. En consecuencia, este trabajo de investigación propone la implementación de un sistema compacto de tratamiento de aguas residuales domésticas a escala piloto en una vivienda ubicada en el corregimiento de San Fernando municipio de Pasto, para evaluar el porcentaje de remoción de carga contaminante. El sistema está compuesto por cinco fases; cribado, tratamiento anaerobio con filtro percolador, tratamiento aerobio con sistema de aireación, filtro clarificador, y desinfección por peróxido de hidrógeno, los resultados se obtuvieron analizando parámetros como coliformes totales y fecales, sólidos totales, DQO y DBO<sub>5</sub>, grasas y aceites, alcalinidad, temperatura, pH y turbiedad los cuales permitieron determinar la exitosa viabilidad del sistema con un porcentaje de remoción mayor al 80% de carga contaminante.

**Palabras Clave:** Aguas Residuales Domésticas, Carga Contaminante, Filtros de Remoción, Porcentaje de Remoción, Sistemas de tratamiento de aguas residuales.

### **ABSTRAC**

In Colombia, due to the scarce treatment generated by diverse activities, health and sanitation problems have occurred in a successive and incremental way in several regions. One solution to this problem has been the construction of wastewater treatment systems (STAR), according to the Ministry of Environment (2014) there are currently 237 STARs built in 235 municipalities, representing 21,7% of the country's municipalities. In the department of Nariño, considering its population of 64 municipalities in 2005, it was estimated that the uncontrolled dumping of domestic wastewater contributes a pollutant load of 113,66 tons / day of COD, 71,04 ton / day of BOD and 106,55 ton / day in suspended solids, whose main effect is the contamination of soil, atmosphere and surface and underground waters. Consequently, this research project proposes the implementation of a compact system of domestic wastewater treatment at pilot scale in a house located in the municipality of San Fernando, municipality of Pasto, to evaluate the percentage of removal of contaminant load. The system is composed of five phases; screening, anaerobic treatment with percolating filter, aerobic treatment with aeration system, clarifying filter, and disinfection by hydrogen peroxide, the results were obtained by analyzing parameters such as total and fecal coliforms, total solids, COD and BOD, fats and oils, alkalinity, temperature, pH and turbidity which allowed to determine the successful viability of the system with a percentage of removal greater than 80% of pollutant load.

**Key words:** Domestic Residual Waters, Contaminant Load, Removal Filters, Removal Percentage, Wastewater treatment systems.

## INTRODUCCIÓN

Desde la primera aparición de las poblaciones humanas ha sido inevitable que se generen aguas residuales, dado que estas son producto de actividades cotidianas en cualquier parte del mundo (Romero, 2013). La problemática de la generación de estas aguas según Espigares y Pérez (2014), es que muchas poblaciones no controlan sus efectos contaminantes y utilizan los cuerpos de agua como sitios de disposición, afectando indirectamente el suelo, la fauna, la flora, especies animales e incluso la salud de los habitantes.

Peláez *et al.*, (2016) complementa que, cuando las aguas residuales llegan a los ríos o cuerpos de agua sin ningún tratamiento o desinfección suelen contaminarlos con altas concentraciones de bacterias, virus y parásitos creándose un grave problema de salud pública.

Con el transcurrir del tiempo y ante la necesidad de deshacerse de estos residuos líquidos se ha hecho preciso desarrollar sistemas de tratamiento sostenibles acordes a las condiciones socioeconómicas y culturales de cada lugar, surgiendo varias alternativas de tratamiento y disposición apropiada que como propone Rubio *et al.*, (2013) deben estar basadas en el conocimiento de las características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales y sus efectos principales sobre las fuentes receptoras.

Lozano (2016), afirma que este tipo de tratamientos contribuyen al efecto de resiliencia natural de los ecosistemas acuáticos, buscando el mejoramiento de las condiciones de salud de las personas y una verdadera interacción con el medio ambiente permitiendo su cuidado y conservación en el tiempo, Escobar *et al.* (2016) complementa que, las disposiciones finales de las aguas residuales tratadas deben cumplir con las normas y criterios definidos por las autoridades ambientales.

Según la Organización de las Naciones Unidas ONU (2015), en los países de América Latina y el Caribe, casi 80 millones de personas no tienen acceso a servicios de agua potable y unos 120 millones a servicios de saneamiento, la situación se ve agravada por la creciente contaminación hídrica que alcanza niveles alarmantes en la mayoría de las cuencas y cuerpos de agua, debido a la falta de tratamientos de aguas servidas.

El Ministerio de Ambiente, complementa que la baja cobertura de saneamiento se debe principalmente a la escasez de recursos económicos para desarrollar proyectos de saneamiento mediante tecnologías convencionales (MINAMBIENTE, 2015).

Con referencia a lo anterior, esta investigación propone evaluar el porcentaje de remoción de carga contaminante de un sistema compacto de tratamiento de aguas residuales domésticas a escala piloto instalado en una vivienda rural en el corregimiento de San Fernando Municipio de Pasto.

Para ello, se usó una metodología empírica encaminada a aumentar la sostenibilidad de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas convencionales y disminuir los impactos ocasionados por sus vertimientos, extrayendo las etapas más eficientes de los sistemas de tratamiento empleados comúnmente a gran escala e implementarlos de manera que sea accesible a pequeñas comunidades limitadas al acceso de alternativas de tratamiento altamente tecnificadas.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Características de la Zona**

El estudio se llevó a cabo en una vivienda rural de 5 habitantes en el Corregimiento de San Fernando, Verada Dolores Reten, Municipio de Pasto (Nariño – Colombia) con coordenadas de latitud 1,2018087 y longitud -77,23343, lugar que posee un clima de Bosque húmedo montano bajo bh-MB (Alcaldía de Pasto, 2015) . El promedio de lluvia total anual es de 796 mm, temperatura promedio de 12,8 °C, un promedio de brillo solar de 3 horas/día y una humedad relativa del aire que oscila durante el año entre 74 y 8 %, siendo mayor en la época lluviosa del segundo semestre (IDEAM, 2015)

### **Diseño del sistema**

Se realizó el diseño de un sistema compacto a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales domésticas basado en la estructura de una PTAR convencional, tomando en cuenta los lineamientos establecidos por Metcalf y Eddy (2003) en Ingeniería de Aguas Residuales, Romero (2013) en Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño y el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – Resolución 0330. de 2017 (MINAMBIENTE, 2017). El sistema contempló los siguientes tratamientos:

- Cribado
- Filtro percolador anaerobio
- Filtro percolador aerobio
- Filtro clarificador de flujo lento
- Desinfección con peróxido de hidrógeno

### **Inoculación bacteriana**

Las etapas de remoción biológica (filtro percolador anaerobio y filtro percolador aerobio) se inocularon durante una semana con 2 litros de Biodyne®-301 cada etapa, un producto formulado para la inoculación bacteriana en PTARs convencionales el cual mejora la eficiencia de los tratamientos.

Está compuesto por  $1 \times 10^8$  microorganismos/ml aproximadamente, 29 cepas de microorganismos vivos benéficos, en su mayoría facultativos y con diferentes capacidades de degradación de compuestos presentes en las aguas residuales como grasa animal y vegetal, aceites, almidones, proteínas y celulosa. El vehículo es un nutriente líquido a base de proteínas de origen vegetal, azúcares y elementos minerales (Biodyne, 2013).

Posterior a la inoculación se determinó un periodo de estabilización del sistema de dos meses, tiempo en el cual las bacterias se multiplican y adaptan a la microbiota del licor de mezcla y los lodos del sistema. En la medida que esto sucede las cepas pueden degradar una fracción de esos lodos no digeridos dejando escapar gases atrapados producto de la descomposición anaeróbica, este efecto suele durar unos días mientras la PTAR se estabiliza. El resultado final es un aumento de la eficiencia del sistema gracias a una mejor degradación de la materia orgánica que reduce la acumulación de lodos. (Biodyne, 2013).

### **Análisis Físico-Químico**

La normatividad colombiana vigente, (Resolución 0631 de 2015, MINAMBIENTE, 2015) establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales (Tabla 1).

**Tabla 1.** Límites permisibles para vertimientos de aguas residuales.

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Aguas residuales domésticas (ARD) de las soluciones individuales de saneamiento de viviendas unifamiliares o bifamiliares</b>	<b>Aguas residuales domésticas (ARD), y de las aguas residuales (ARD - ARnD) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales, con una carga menor o igual a 625,00 kg/día DBO<sub>5</sub></b>
<b>pH</b>	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
<b>Demanda química de oxígeno (DQO)</b>	mg/L O <sub>2</sub>	200,00	180,00
<b>Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>)</b>	mg/L O <sub>2</sub>	-	90,00
<b>Sólidos suspendidos totales (SST)</b>	mg/L	100,00	90,00
<b>Sólidos sedimentables (SSED)</b>	mg/L	5,00	5,00
<b>Grasas y aceites</b>	mg/L	20,00	20,00

Fuente: Resolución 0631 (MINAMBIENTE, 2015)

Para la evaluación de la remoción de carga contaminante del sistema piloto para el tratamiento de aguas residuales domésticas se planteó el análisis físico-químico de los parámetros más representativos en el agua residual y que signifiquen una evaluación pertinente a la normatividad colombiana (Tabla 2)

**Tabla 2.** Parámetros escogidos para evaluación del sistema.

<b>Parámetros físicos</b>	<b>Parámetros químicos</b>	<b>Parámetros Microbiológicos</b>
<b>Temperatura</b>	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) 20 °C	Coliformes totales (CT)
<b>Sólidos totales</b>	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Coliformes fecales (CF)
<b>Grasas y aceites</b>	pH	
<b>Turbiedad</b>	Alcalinidad	

El análisis se realizó en el laboratorio especializado de Análisis Químico y Aguas de la Universidad de Nariño sede Torobajo.

### **Muestreo**

El tamaño de muestra se determinó a través de la toma inicial de 5 muestras para estimar la desviación estándar de los datos y usando el software estadístico SPSS, se determinó para un nivel de confianza del 95 % un número de 30 muestreos.

Una vez estabilizado el sistema se tomaron las muestras en afluente y efluente del mismo para evaluar su remoción. El muestreo se realizó a través de la Metodología de muestreo y aforo de aguas residuales propuesta por IDEAM (2013). Se obtuvieron datos confiables en cuanto al aforo, y fracciones volumétricas representativas para la realización de los análisis físicos, químicos y biológicos.

Para realizar el muestreo típico durante un día, se tomó una (1) muestra compuesta de seis (6) horas de duración, recolectando muestras individuales (alícuotas) cada media hora (30 minutos), en volúmenes proporcionales al caudal medido durante cada período. Para calcular el volumen de la alícuota se aplicó la siguiente ecuación de proporcionalidad:

$$V = \frac{Q_i * v}{Q * n}$$

Donde:

V= volumen de la alícuota

Q<sub>i</sub>= Caudal inicial en el instante t

v= volumen total a componer

Q= caudal promedio durante la jornada de aforo.

n= Número de muestras tomadas

### **Análisis estadístico**

Se calculó la reducción de los parámetros DBO<sub>5</sub>, DQO, turbiedad, sólidos totales, grasas y aceites, coliformes totales y coliformes fecales mediante la diferencia en unidades de estos grupos antes y después del proceso de tratamiento. Con estas variables, se ajustaron los datos a una distribución normal estimando las frecuencias de los datos y definiendo los intervalos a través de la regla de Sturges.

Se empleó estadística descriptiva y se aplicó una prueba de confiabilidad estimando el alfa de Cronbach a través del programa estadístico SPSS en el cual se obtuvo un valor de 0,91 que según Martínez (2013) indica una confiabilidad elevada en los datos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización del agua residual

Después de realizar el análisis fisicoquímico de los parámetros y comparando los valores de entrada al sistema con caracterizaciones ya establecidas para el ARD, se puede inferir que las ARD evaluadas presentan características muy similares a las descritas en Metcalf y Eddy (2003) y Ekama & Wentzel (2017) con valores promedios entre las caracterizaciones de ARD Media y ARD fuerte, inclinándose por la caracterización de agua residual fuerte lo que puede deberse al caudal reducido (400 L/día) que presentó el efluente, esto aumentó la concentración de los parámetros (Tabla 3).

**Tabla 3.** Comparación de los parámetros del afluente del sistema con caracterizaciones de ARD

Parámetros	Datos este estudio	Metcalf y Eddy ARD Fuerte	Metcalf y Eddy ARD Media	Metcalf y Eddy ARD Débil
Temperatura (°C)	18,2	20,0	20,0	20,0
Sólidos totales (mg/L)	1082,8	1200,0	720,0	350,0
Grasas y aceites (mg/L)	126,0	150,0	100,0	50,0
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	98,2	200,0	100,0	50,0
DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	394,6	400,0	220,0	110,0
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	962,6	1000,0	500,0	250,0
pH (U pH)	8,5	8,0	8,0	8,0
Coliformes totales (UFC 100 ml)	209166666,7	100000000,0	100000000,0	10000000,0
Coliformes fecales (UFC 100 ml)	82943333,3	100000000,0	10000000,0	1000000,0

Los parámetros registrados en el afluente del sistema superan los límites establecidos para vertimientos puntuales de viviendas unifamiliares o bifamiliares sobre cuerpos de agua superficiales establecidos en la normatividad colombiana vigente.

### **Caudal de diseño**

El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS (Resolución 0330, 2017), establece una dotación neta de agua de 120 litros por habitante/día para alturas superiores a los 2000 msnm.

Para la vivienda de 5 habitantes se estimó una dotación de agua de 600 L/día, teniendo en cuenta el coeficiente de retorno  $CR=0,85$  de esta dotación se prevé un caudal teórico de agua residual de 510 L/día y aplicando un coeficiente de mayoración del sistema de entre 1,4 y 3,4 que dicta la normatividad colombiana vigente para evitar colapsos debido a grandes flujos de caudal, se optó por una proporción de caudal diario de 1,95, es decir un caudal de diseño de 995 L/día.

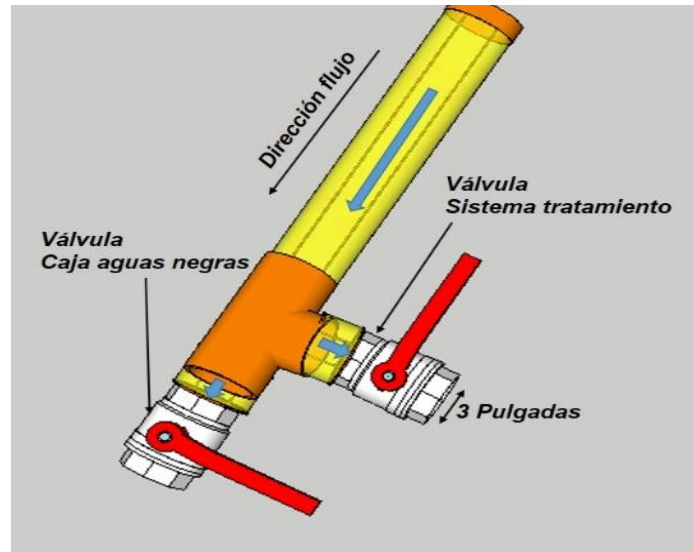
### **Tiempo de retención**

Realizando el aforo del caudal residual promedio de la vivienda a través del método volumétrico MINAMBIENTE (2017), se obtuvo un valor de 400 L/día, teniendo en cuenta el volumen útil del sistema (800 L), el TRH se establece en 48 horas.

### **Descripción del sistema de tratamiento**

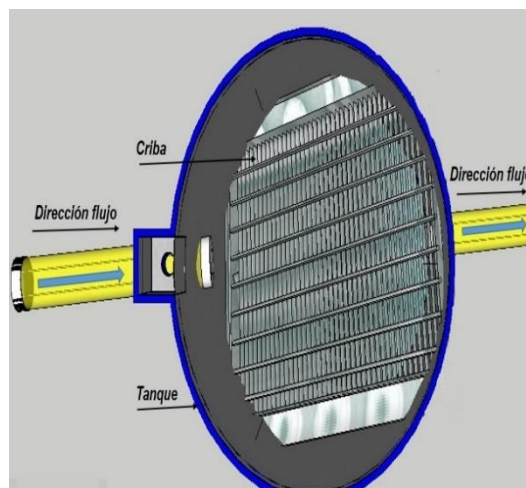
A continuación, se describe el sistema de tratamiento:

**Bypass / Llave de cambio de dirección del flujo.** Para re direccionar el flujo del agua residual de la vivienda hacia el sistema de tratamiento se usaron dos llaves de 3 pulgadas que forman un bypass y brindan la posibilidad de controlar el flujo hacia el sistema de tratamiento o hacia la caja de aguas residuales (Figura 1).

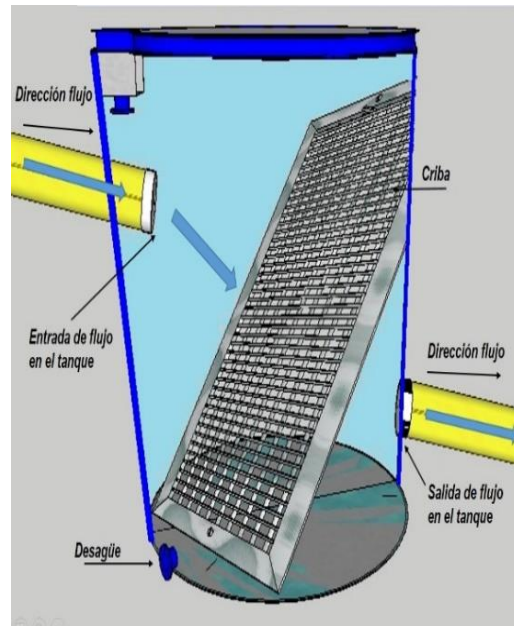


**Figura 1.** Bypass de entrada.

**Tanque 1 / Criba:** Es la primera etapa en el sistema de tratamiento, los dispositivos de rejillas y cribado son necesarios para evitar el ingreso de objetos gruesos y sirven como pantallas para limitar el ingreso de material flotante (Resolución 0330, 2017). Se conforma de un tanque de igualación de plástico de 250 L, 1m de altura por 80 cm de diámetro y una maya en este caso de aluminio que se denomina criba de 80 cm de largo por 80 cm de ancho cuya función es retener sólidos mayores, colocada de manera transversal con una inclinación de 45° (Figura 2 y 3).



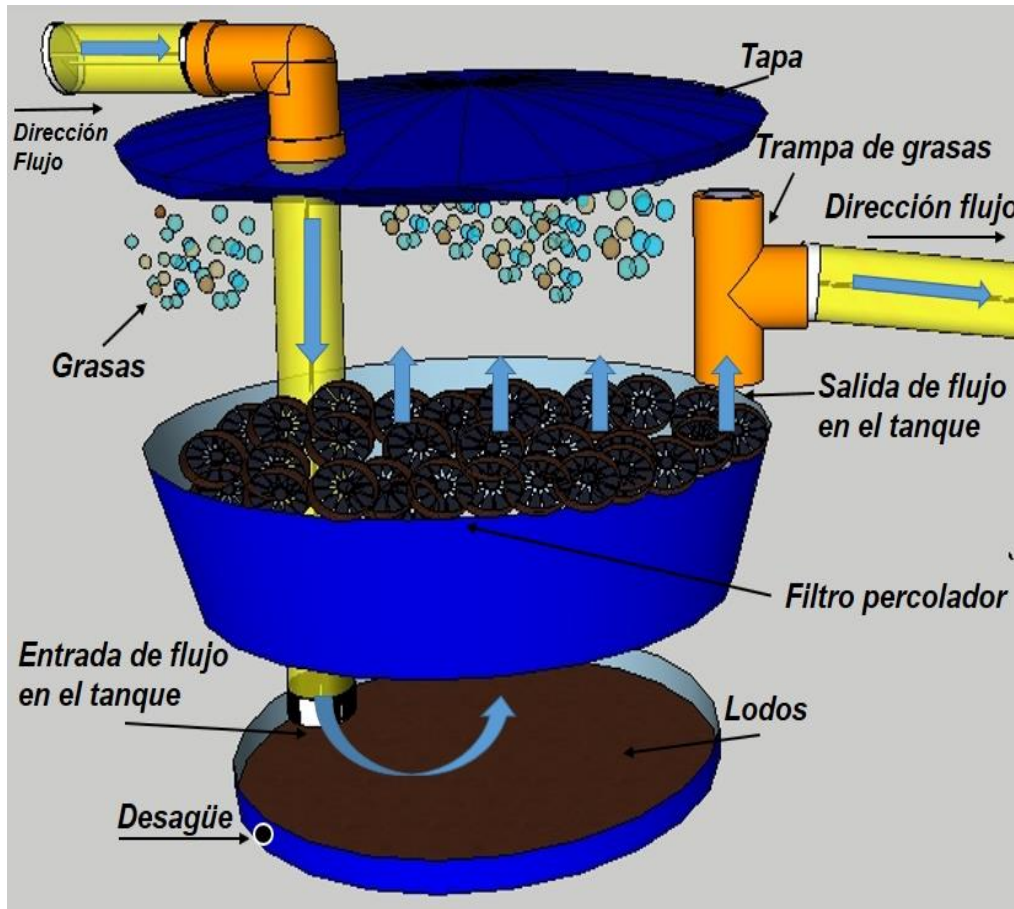
**Figura 2.** Tanque 1 Criba visión lateral



**Figura 2.** Tanque 1 Criba visión superior.

**Tanque 2 / Tratamiento Anaerobio:** Segunda etapa del sistema de tratamiento, el flujo ingresa de manera ascendente a través de una tubería de tres pulgadas proveniente del **Tanque 1**, posterior a ello atraviesa el filtro percolador anaerobio cuyo lecho filtrante está conformado por aproximadamente 200 rosetones octogonales en polipropileno virgen de textura rugosa, con filtro UV, de 18,5 cm de diámetro, 5 cm de altura, 78 g de peso unitario, y un área superficial de contacto de  $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$  los cuales permiten que no haya flujos preferenciales además de admitir más de 10000 puntos de contacto del agua con el lecho filtrante (Plásticos B&R, 2017), (Figura 4).

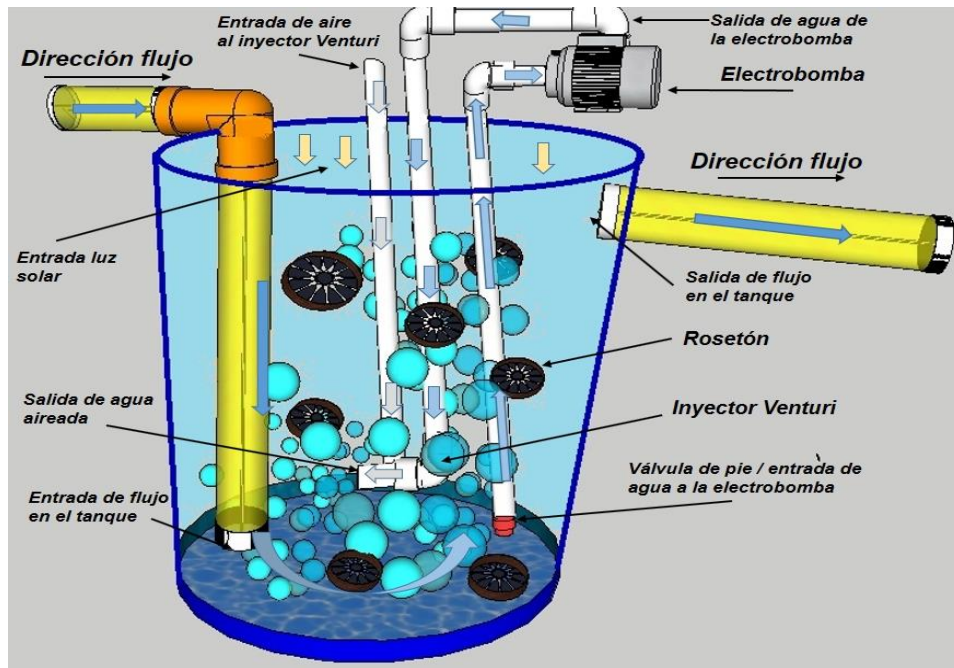
La normatividad colombiana vigente, establece que cuando se prevean aportes de grasas y aceites, debe considerarse el empleo de sistemas de remoción de los mismos, con el fin de proteger los procesos de tratamiento subsiguientes es por esto que una vez atravesado el filtro percolador anaerobio, el flujo de agua es conducido a la siguiente etapa utilizando una trampa de grasas lo que mejora la eficiencia del siguiente tratamiento.



**Figura 3.** Tanque 2 filtro percolador anaerobio.

**Tanque 3 / Tratamiento Aerobio:** Tercera etapa del sistema de tratamiento, el flujo ingresa de manera ascendente para mejorar el periodo de retención del agua en esta etapa. Dentro del tanque también se adecuaron algunos rosetones de polipropileno lo que mejora la superficie de contacto (Zamora, 2015). En los sistemas biológicos aerobios el suministro de oxígeno es importante para que los microorganismos puedan oxidar la materia orgánica, depurando las aguas residuales (Shuta *et al.*, 2017).

El tanque cuenta con aireación constante a través de un sistema de aireación Venturi para proveer a las bacterias de una cantidad de oxígeno adecuada para sus procesos bióticos (Figura 5)

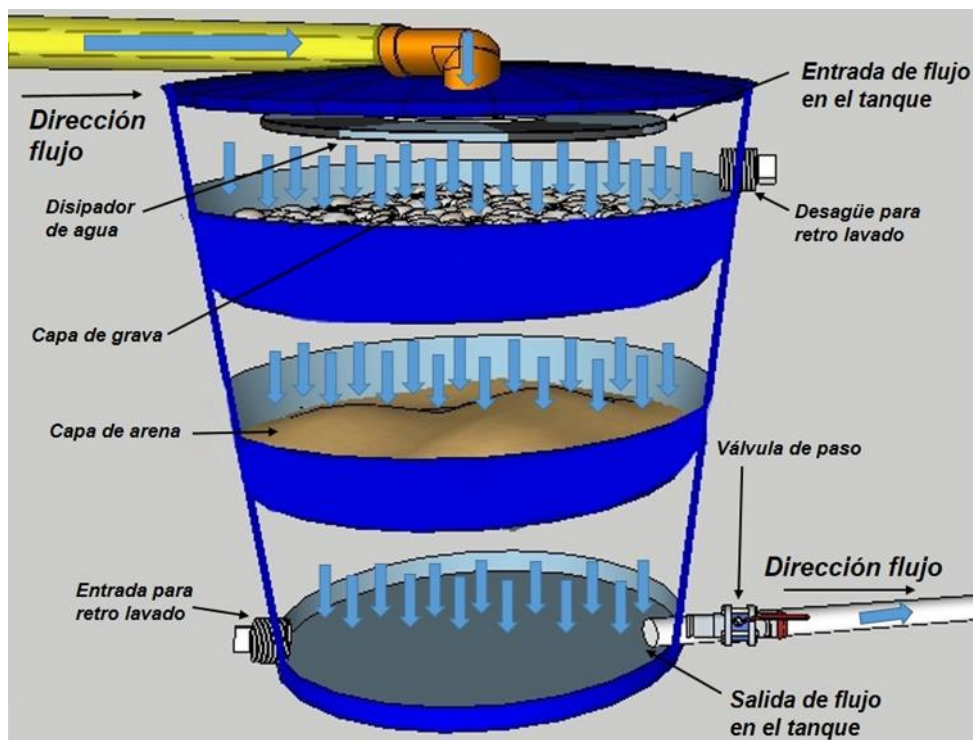


**Figura 5.** Tanque 3 sistema de remoción aerobio

**Sistema de Aireación con inyector Venturi:** Se fundamenta en el Principio de Bernoulli y el principio de continuidad de masa, un inyector del tipo Venturi genera succión debido al diferencial de presión negativa que se produce entre su entrada y su salida al reducir su diámetro de garganta y acelerar la velocidad del fluido debido a este decremento en los diámetros (García *et al.*, 2015). Esta alternativa de aireación es más barata que los sistemas convencionales blowers cuyo costo puede ser muy elevado.

El sistema se compone de una electrobomba de 0,5 HP y una tubería de presión de material PVC y color blanco de 1 pulgada de diámetro, al final de la tubería hay una reducción en el diámetro de la misma para generar el efector Venturi que permite el ingreso de aire, el resultado es la succión y mezcla rápida del aire con el agua (Figura 5).

**Tanque 4 / Filtro Clarificador:** Cuarta etapa del sistema de tratamiento, el flujo ingresa de manera descendente dado que el material filtrante se ubicó de mayor a menor tamaño siguiendo las recomendaciones de la normatividad colombiana vigente (Figura 6).



**Figura 4.** Tanque 4 filtro clarificador.

Los materiales filtrantes fueron grava y arena con las siguientes características (Tabla 4).

**Tabla 4.** Características del material filtrante.

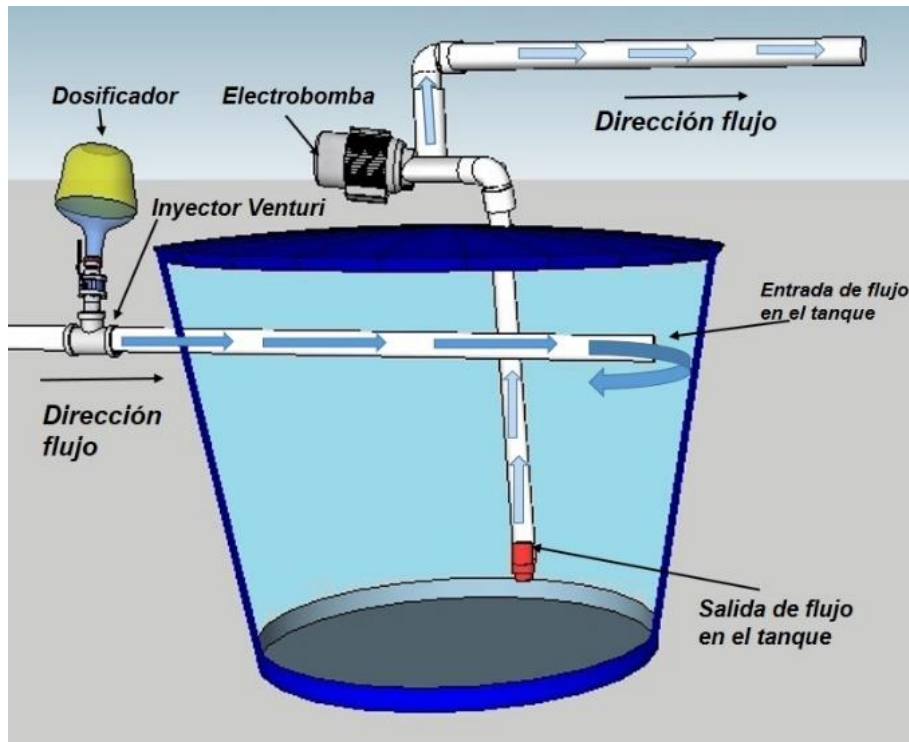
Capa	Diámetro (mm)	Solubles en ácido (% máx.)
1 Grava Fina	12 – 20	25
2 Gravilla	3 – 6	17,5
3 Arena Gruesa	0,8 – 1,2	<5

Fuente (Carbotecnia, 2004)

**Tanque 5 / Desinfección:** Quinta etapa del sistema de tratamiento, cuenta con un segundo inyector Venturi en serie, con inyección superior lo que presenta ventajas, a igualdad de caudal inyectado, frente a inyección inferior (Manzano *et al.*, 2015). Posee menor diferencial de presión en comparación con el tanque aerobio, aquí se aplicaron dosis de 300 mg/L de peróxido de hidrógeno segundo lo recomendado por Metcalf y Eddy (2003). en concentraciones superiores al 6 %.

Este sistema también brinda grandes resultados en la inyección de productos químicos en el agua, operación conocida como quimigación (Armando *et al.*, 2009).

El tanque cuenta además con una abertura en tapa para el ingreso de la tubería de recirculación de 1 pulgada y de color blanco, la cual se conecta a una electrobomba de 0,5 HP y una tubería de presión de material PVC y color blanco de 1 pulgada de diámetro (Figura 7)



**Figura 7.** Tanque de desinfección y estabilización.

**Tubería/ Sanitaria:** La tubería utilizada para la conducción del flujo es de PVC 3 pulgadas color amarillo para aguas residuales.

**Tubería / Presión:** Tubería PVC de 1 pulgada color blanco para el sistema de aireación Venturi que requiere presión y los sistemas de recirculación, Tubos de Policloruro de Vinilo (PVC).

#### **pH, temperatura y alcalinidad del afluente y efluente**

El pH y la temperatura tienen un papel importante en el tratamiento biológico de aguas residuales, Romero (2013) plantea que a pesar de que las bacterias pueden tolerar rangos amplios de estos parámetros, el crecimiento óptimo se suele producir en un intervalo reducido (Tabla 5).

**Tabla 5.** Comparación de los valores de pH, temperatura y alcalinidad en el afluente y efluente del sistema

<b>Parámetros</b>	<b>Afluente</b>	<b>Efluente</b>
<b>pH (U pH)</b>	8,5	6,7
<b>Temperatura (°C)</b>	18,2	15
<b>Alcalinidad (mg CaCO<sub>3</sub>/L)</b>	98,2	40,4

El valor promedio de pH en el afluente del sistema (8,5) se encuentra dentro de los rangos óptimos para el tratamiento biológico debido a que tanto el ion hidrógeno ( $H^+$ ) como el ion hidroxilo ( $OH^-$ ) tienen un efecto inhibitorio a medida que sus respectivas concentraciones se incrementan, esto ocurre cuando el pH aumenta por encima de 8,5 (aumento de iones  $OH^-$ ) o disminuye por debajo de 7,0 (aumento de iones  $H^+$ ). Las tasas óptimas de nitrificación se encuentran entre  $7,0 < pH < 8,5$  con una disminución abrupta fuera de este rango (Ekama y Wentzel, 2017).

El efluente presentó una disminución en los valores del pH (6,7) debido a los procesos biológicos de remoción de cargas y a la aplicación del desinfectante en la etapa final dado que el valor inicial del pH del agua tiende a disminuir a la vez que se reduce la alcalinidad por neutralización.

Los valores para la temperatura en el afluente del sistema (18 °C) se mantuvieron relativamente constantes con variaciones de  $\pm 1$  grado, esto mejora significativamente el tratamiento ya que cuando la temperatura decrece de manera drástica la producción diaria de lodos se incrementa (Ekama y Wentzel, 2017).

A pesar de que la temperatura ideal para tratamientos biológicos se encuentra en los 20 °C y los 30 °C, el tratamiento a 18 °C generó resultados satisfactorios. El efluente presentó una disminución de la temperatura (ver *tabla 5*), debido a la reducción significativa de los componentes iniciales del ARD y a los procesos de filtración lenta y desinfección. La temperatura del ARD suele ser más elevada que la del agua de suministro, debido principalmente a la incorporación de agua caliente de las actividades domésticas (Metcalf y Eddy, 2003).

Los valores de alcalinidad en la entrada del sistema se registraron alrededor de los 98,2 mg/L-CaCO<sub>3</sub>, inclinándose a la caracterización de carga media propuesta por Metcalf Y Eddy (2003), lo cual se debe probablemente al constante uso de una gran variedad de productos domésticos que aportan diferentes elementos como calcio, magnesio, sodio, potasio e incluso amoníaco contribuyendo a la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de los mismos elementos en el sistema (MINVIVIENDA, 2014).

Al disminuir el pH (6,7) en efluente, el potencial de neutralización de la alcalinidad también disminuye (40,0 mg CaCO<sub>3</sub>/L) ya que el medio se vuelve más ácido.

### **Remoción de turbiedad y sólidos totales**

Una de las características físicas más importantes del agua residual es el contenido total de sólidos, Ekama & Wentzel (2017) indican que un afluente que contiene 500 mg de DQO puede producir de 200 a 300 mg de sólidos suspendidos, sin retención de biomasa, estos valores serían la concentración real de lodo en el proceso de tratamiento.

Para los valores obtenidos en el afluente 1080 mg/l en comparación con el efluente 214 mg/l evidencian un porcentaje de remoción del 80,2 % (Tabla 6), logrado entre procesos de sedimentación, filtración (clarificador) y tratamiento biológico dado que cerca del 75 % de los sólidos en suspensión y 40 % de los sólidos filtrables de un agua residual son de naturaleza orgánica (Metcalf y Eddy, 2003)

La turbiedad registrada en la caracterización del afluente presenta valores altos típicos de las ARD, el método usado para la determinación de la turbiedad el cual mide un rango de 0 a 1000 UNT estimó el valor en el afluente por encima de las 1000 UNT, Los procesos tanto físicos como químicos sucedidos dentro del tratamiento redujeron significativamente su valor hasta alcanzar un promedio de 20 UNT en el efluente, efectuándose una remoción del 98 %.

**Tabla 6.** Comparación de los valores de los parámetros en el afluente y efluente del sistema

Parámetros	Afluente del sistema	Efluente del sistema	Porcentaje de remoción (%)	Límites normatividad colombiana
Sólidos totales (mg/L)	1082,8	214,5	80,2	-
Grasas y aceites (mg/L)	126,0	23,7	81,2	20
DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	394,6	<2	99,5	90
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	962,6	<20	97,9	200
pH (U pH)	8,5	6,7	-	6 a 9
Turbiedad (UNT)	1000	20,6	97,9	-
Coliformes totales (UFC 100 ml)	209166666,7	0,0	100,0	-
Coliformes fecales (UFC 100 ml)	82943333,3	0,0	100,0	-

### Remoción de DBO<sub>5</sub> y DQO

Aunque el caudal promedio de diseño fue de 510 litros/día, el sistema reporto un caudal aproximadamente de 400 L/día y un TRH de 48 horas. La concentración de la DBO<sub>5</sub> de entrada al sistema vario entre 389,154 mg O<sub>2</sub>/L y 399,742 mg O<sub>2</sub>/L con un promedio de 394,588 mg O<sub>2</sub>/L; la DQO de entrada vario de 957,541 mg O<sub>2</sub>/L a 967,251 mg O<sub>2</sub>/L con un promedio de 962,639967 mg O<sub>2</sub>/L, generando una relación DBO<sub>5</sub>/DQO de 0,4 clasificándola como biodegradable según Martínez (2010).

En las concentraciones de salida del sistema la DBO<sub>5</sub> arrojó valores menores a 2 mg O<sub>2</sub>/L y la DQO valores menores a 20 mg O<sub>2</sub>/L (Tabla 6), obteniendo un porcentaje total de remoción del 99,5 % y 98 % respectivamente, superando el valor límite máximo permisible en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas establecidos en la normatividad colombiana vigente (Resolución 0631 de 2015).

La concentración media de DBO<sub>5</sub> de salida fue menor que la concentración máxima permitida de 90 mg/L O<sub>2</sub>, definida por la misma Resolución, lo que indica que esta alternativa de tratamiento es muy recomendable dada su eficiencia en el proceso de remoción de DBO<sub>5</sub> y DQO.

### Remoción de grasas y aceites

Metcalf y Eddy (2003) señalan que las grasas y aceites son uno de los principales grupos de sustancias orgánicas en las aguas residuales (10 por 100). Su efecto en los sistemas de tratamiento de aguas residuales suele deberse a que interfieren con el intercambio de gases

entre el agua y la atmósfera impidiendo el libre paso del oxígeno hacia el agua, ni la salida del CO<sub>2</sub> del agua hacia la atmósfera, en casos extremos pueden llegar a producir la acidificación del agua junto con bajos niveles del oxígeno disuelto, además de interferir con la penetración de la luz solar (Lozano, 2016).

Los niveles registrados en el efluente del sistema (Tabla 6), indican una presencia significativa de este grupo de sustancias lo que si bien representa un riesgo para rendimiento del sistema, el diseño del filtro percolador anaerobio con una trampa de grasa utiliza estos compuestos que se acumulan en la superficie para que contribuyan a la anaerobiosis como lo indica (Lozano, 2016), esto se ve reflejado en la remoción alcanzada del 81,2 %, aun así es el único parámetro del sistema cuyo valor promedio registrado en el efluente (23,74 mg/L) supera el límite permisible establecido en la normatividad colombiana vigente.

#### **Remoción de coliformes totales y coliformes fecales**

Los valores del afluentes evidencian una concentración de coliformes fecales (E-coli) asociada a un ARD fuerte de composición  $1 \times 10^8$  a  $10^8$  microorganismos en 100 ml (Ekama & Wentzel, 2017). Las bacterias coliformes se utilizan como indicadores de polución por vertidos de origen humano, diariamente cada persona elimina de 100.000 - 400.000 millones de coliformes a través de las heces (Ríos *et al.*, 2017).

Las unidades formadoras de colonias (UFC/100ml) en el sistema de entrada variaron entre 91000000y 363000000; y en la salida del sistema se obtuvieron valores de cero (0) en todas las muestras (30 en total) evidenciando que en la salida del sistema hubo una reducción del 100% de las concentraciones de los organismos coliformes.

Este resultado se debe probablemente a que en las etapas de tratamiento del sistema se hace una remoción de varios tipos de sólidos asociados a las cargas bacterianas (sólidos en suspensión, sólidos sedimentables, sólidos volátiles, entre otros), el filtro percolador anaerobio y en el filtro aerobio hace una remoción de sólidos por oxidación biológica, posteriormente la filtración con el clarificador de grava y arena de diferentes diámetros remueve gran cantidad de microorganismos adhiriéndose en las partículas más pequeñas.

En cada una de estas etapas la remoción de coliformes puede ir aumentando significativamente hasta llegar con bajas cargas al proceso de desinfección donde se

aplicó el desinfectante (peróxido de hidrógeno en concentraciones superiores al 6 %) dando como resultado una eliminación total de coliformes presentes en el agua.

## **CONCLUSIONES**

La caracterización de las aguas residuales permitió establecer que los parámetros tomados en el afluente exceden los límites permisibles de vertimientos sobre cuerpos de agua superficiales, contemplados en la Resolución 0631 (2015).

Los análisis realizados del agua tratada determinaron la remoción de DBO<sub>5</sub>, DQO, turbiedad, sólidos totales, grasas y aceites, coliformes totales y coliformes fecales. Por lo tanto, se deduce que el sistema de tratamiento en general alcanza porcentajes considerablemente altos de remoción.

El efluente del sistema de tratamiento cumple con los límites permisibles de vertimientos sobre cuerpos de agua superficiales, contemplados en la normatividad colombiana vigente exceptuando las grasas y aceites que presentaron una concentración levemente por encima del límite establecido, por lo que se debe trabajar en el mejoramiento del tratamiento para este grupo de sustancias.

Agregar una etapa de desinfección en este caso con peróxido de hidrógeno elevó notablemente la remoción de coliformes totales y fecales respecto a otros estudios que no contemplaron la desinfección.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda implementar mecanismos para remover una mayor cantidad de grasas y aceites dado que fue el parámetro que menor remoción presentó.

Se recomienda medir la remoción de cada etapa del sistema de tratamiento para determinar cuál es la más efectiva y en cual se debe mejorar el rendimiento.

Se debe tomar en cuenta la limpieza y mantenimiento que se debe dar al filtro clarificador y monitorear la acumulación de lodos en el largo plazo.

Implementar sistemas alternativos como paneles solares para reducir el costo energético de las electrobombas.

Introducir un temporizador para alternar entre periodos de tiempo el funcionamiento de las electrobombas el tanque aireador y reducir el consumo energético.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Armindo, R., Botrel, T., Dourado, D. & Mourão, G. (2009). Avaliação do sistema de pulverização com funcionamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 13: 26-32.
- Biodyne. (2013). Bacterias para plantas de tratamiento de aguas residuales. Recuperada de [http://www.biodynebogota.com/agr\\_plantas\\_de\\_tratamiento\\_aguas\\_residuales.html](http://www.biodynebogota.com/agr_plantas_de_tratamiento_aguas_residuales.html) (Archivado por WebCite<sup>®</sup> en <http://www.webcitation.org/73B8sNix6>)
- Carbotecnia. (2004). Filtros de grava, arena sílica y antracita. Recuperada de <https://carbotecnia.info/PDF/boletines/AG-009.pdf> (Archivado por WebCite<sup>®</sup> en <http://www.webcitation.org/73IAvEy8Z>)
- Escobar, M., Tovar, L, & Romero, J. (2016). Diseño de un sistema experto para reutilización de aguas residuales tratadas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26 (2): 21-34. doi: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.1827>.
- Espigares, M & Perez, J. (2014). Aguas residuales. Composición. Recuperada de [http://cidta.usal.es/cursos/edar/modulos/edar/unidades/libros/logo/pdf/aguas\\_residuales\\_composicion.pdf](http://cidta.usal.es/cursos/edar/modulos/edar/unidades/libros/logo/pdf/aguas_residuales_composicion.pdf). (Archivado por WebCite<sup>®</sup> en <http://www.webcitation.org/73BC8N8om>)
- Ekama, G., & Wentzel, M. (2017). Remoción Biológica de Nitrógeno. En G. Amy, D. Brdjanovic, Y. Comeau, G. Ekama, J. García, C. Gerba, . . . G. Zeeman, M. Henze, M. Loosdrescht, G. Ekama, & D. Brdjanovic (Edits.), *Tratamiento biológico de aguas residuales* (C. López, G. Buitrón, H. García, & F. Cervantes, Trads., pp.97-156). Londres, Inglaterra: IWA Publishing. doi:10.2166/9781780409146
- García, A., Landeros, C., Pérez, A., Castañeda, M., Martínez, J., & Carrillo, E. (2015). Inyectores de fertilizante tipo Venturi Aplicación, diseño y simulación. *Revista Iberoamericana de Ciencias*. 2, 111-119.

- IDEAM- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (2013). Metodología de Muestreo y Aforo De Aguas Residuales. Recuperada de <http://catedra.conhydra.com/mod/resource/view.php?> (Archivado por WebCite® en <http://www.webcitation.org/73C2iWSK6>)
- IDEAM- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (2015). Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos. Ministerio de vivienda. Recuperada de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd> (Archivado por WebCite® en <http://www.webcitation.org/73IBMRO71>)
- Lozano, A. (2016). Contribuciones para el tratamiento de aguas residuales con sistemas alternativos de bajo coste. Aplicaciones para el desarrollo en poblaciones reducidas. *Ingeniería Civil: Hidráulica y Ordenación Del Territorio*. doi:<https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.39334>
- Martínez, L. (2013) Estudio de la evolución de una ETAP para la adecuación legislativa. Recuperada de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/10383/Annex.pdf?Sequence=3&isAllowed=y>. (Archivado por WebCite® en <http://www.webcitation.org/73FZk0yLw>)
- Manzano, J., Virginia, C., Moreira, B., Vieira, G., & Vieira, D. (Jun de 2015). Diseño y alternativas en la instalación de inyectores Venturi en riego. *Revista Ciência Agronômica*, 46: 287-298. doi: 10.5935/1806-6690.20150008
- Metcalf y Eddy (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Boston, United States: McGraw-Hill.
- MINAMBIENTE- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2014). Plan nacional de manejo de aguas residuales municipales en Colombia. Recuperada de [http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/PLAN\\_NACIONAL\\_DE\\_MANEJO\\_DE\\_AGUAS\\_RESIDUALES\\_MUNICIPALES\\_EN\\_C](http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/PLAN_NACIONAL_DE_MANEJO_DE_AGUAS_RESIDUALES_MUNICIPALES_EN_C)

OLOMBIA.pdf (Archivado por WebCite® en  
<http://www.webcitation.org/73BCaSsT3>)

MINVIVIENDA- Ministerio de vivienda, ciudad y territorio (2017). Resolución 0330 de 2017. Recuperada de  
<http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/0330%20-%202017.pdf>  
(Archivado por WebCite® en <http://www.webcitation.org/73IC4SZaM>)

MINAMBIENTE-Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 0631 de 2015. Recuperada de  
[http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res\\_631\\_marz\\_2015.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf) (Archivado por WebCite® en  
<http://www.webcitation.org/73ICHM1GP>)

ONU- Organización de las Naciones Unidas (2015). Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos Hídricos en el mundo. Recuperada de  
<http://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/water/WWDR-spanish129556s.pdf>. (Archivado por WebCite® en  
<http://www.webcitation.org/73BFtK17E>)

Peláez, D., Guzmán, B., Rodríguez, J., Acero, F. & Nava, G. (2016). Presencia de virus entéricos en muestras de agua para el consumo humano en Colombia: desafíos de los sistemas de abastecimiento. *Biomédica*. 36(2): 169-178. doi:  
<http://dx.doi.org/10.7705/biomedica.v36i0.2987>.

Plásticos B&R. (20 de Octubre de 2017). Ficha técnica relleno plástico tipo rosetón. Recuperado de <http://plasticosbyr.com.co/productos/relleno-plastico/tipo-roseton/> (Archivado por WebCite® en <http://www.webcitation.org/73IBqd9kH>)

Alcaldía de Pasto. (2015). POT- Plan de Ordenamiento de Pasto. Recuperado de  
<http://www.pasto.gov.co/index.php/nuestras-dependencias/secretaria-de-planeacion/plan-de-ordenamiento-territorial/category/397-cuadernos-diagnosticos-pot-2015-2027#> (Archivado por WebCite® en  
<http://www.webcitation.org/73IBwVofd>)

- Ríos, S., Agudelo, RM, & Gutiérrez, LA. (2017). Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*; 35(2): 236-247. doi: 10.17533/udea.rfnsp.v35n2a08
- Romero, J (2013). Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño. 4° ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería. 58-230pp.
- Rubio, A., Chica, E. & Peñuela, G. (2013). Procesos de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes. *Ambiente & Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. 8(3): 93-103. doi: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1176>
- Shuta, H., Ávila, L., Flores, R., & Ortega, O. (2017). Optimización del sistema de aireación con paneles solares. *Revista de investigaciones de la escuela de posgrado fotovoltaicos para el tratamiento de aguas residuales en la bahía interior de puno*, Vol. 6, 92-102. doi:<http://dx.doi.org/10.26788/riepg.2017.30>
- Zamora, R. (2015). Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales La Marina. (E. C. Garavito, Ed.) Recuperado de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/363> (Archivado por WebCite® en <http://www.webcitation.org/73ICY9dzo>)