

**EVALUACIÓN TÉCNICA Y OPERATIVA DE LA PLANTA PILOTO DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE  
SOTAQUIRÁ, BOYACÁ**

**CLARA ESPERANZA CASTRO BOHÓRQUEZ  
JUAN PABLO HERNÁNDEZ PERILLA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA  
2017**

**EVALUACIÓN TÉCNICA Y OPERATIVA DE LA PLANTA PILOTO DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE  
SOTAQUIRÁ, BOYACÁ**

**CLARA ESPERANZA CASTRO BOHÓRQUEZ  
JUAN PABLO HERNÁNDEZ PERILLA**

**Monografía para optar al título de  
Especialista en Ingeniería Ambiental**

**Director**

**RICHARD DÍAZ GUERRERO  
ING. QUIMICO  
ESP. ING AMBIENTAL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA  
2017**

Ni la Universidad Industrial de Santander, ni los jurados se hacen responsables de los conceptos expuestos en el presente documento.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi formación profesional, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

Le doy gracias a mis padres Jorge Alberto y Martha, por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida, pero sobre todo por ser un excelente ejemplo de vida a seguir.

Le agradezco a la Empresa de Servicios Públicos del Municipio de Sotaquirá, por brindarnos la oportunidad de desarrollar la presente monografía, por el apoyo y las facilidades que nos fueron otorgadas.

Gracias Ing. Richard por su apoyo y capacidad de guiar nuestras ideas, por su disponibilidad y paciencia.

Clara Castro

Gracias a Dios por guiarme en todo este proceso y darme la oportunidad de cumplir un objetivo más en el camino. Agradezco a mi hijo, familia y amigos que ayudaron en este proceso el cual es de gran importancia para mi vida profesional y personal

Agradezco al ingeniero Richard por ayudarnos a realizar este trabajo de grado y brindarnos su conocimiento para la solución de este proyecto.

Juan Pablo Hernández Perilla

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	22
1. JUSTIFICACIÓN .....	23
2. GENERALIDADES .....	24
2.1. Aspectos Generales del Municipio de Sotaquirá .....	24
2.1.1 Características Físicas del Territorio.....	25
2.1.2 Hidrografía .....	26
2.1.3. Contexto Geográfico .....	27
2.1.4. Contexto Demográfico .....	28
2.1.5. Contexto Demográfico .....	29
2.1.6. Contexto Socioeconómico .....	29
2.2. Tratamiento de Aguas Residuales Municipales .....	29
2.2.1. Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR):.....	31
2.2.1.1. Tipos de tratamiento de aguas residuales .....	31
2.2.2. Marco Legal .....	33
3. RECONOCIMIENTO DE LA PLANTA Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO .....	<b>34</b>
3.1. Reconocimiento de la PTAR.....	34
3.2. Descripción del Sistema de Tratamiento .....	37
3.3. Tratamiento Preliminar del Sistema. ....	39
3.3.1.1. Sedimentador Primario .....	43
3.3.1.2. Tanque Imhoff.....	44
3.3.1.3. Reactor UASB.....	44
3.3.2 Tratamiento Secundario.....	46
3.3.2.1. Humedales Artificiales.....	46
3.3.2.2. Lagunas de Estabilización .....	49
3.3.3 Tratamiento de lodos .....	54
3.3.3.1. Digestor de lodos .....	54

3.3.3.2. Lechos de Secado .....	55
4. EVALUACIÓN TÉCNICA Y OPERATIVA A LAS UNIDADES EXISTENTES EN LA PTAR DEL MUNICIPIO DE SOTAQUIRA .....	57
4.1. Diagnóstico del Sistema de Tratamiento .....	57
4.1.1. Componentes Técnicos de la PTAR: .....	57
5. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA PTAR DEL MUNICIPIO DE SOTAQUIRÁ.....	64
6. CONSIDERACIONES TÉCNICAS Y OPERATIVAS PARA EL MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES .....	74
6.1. Recomendaciones de proceso.....	76
7. IDENTIFICACIÓN DE MARCO NORMATIVO PARA REÚSO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS .....	78
7.1. Viabilidad de Reutilización del Agua Tratada para Fines Agrícolas .....	83
8. CONCLUSIONES.....	85
9. RECOMENDACIONES .....	87
BIBLIOGRAFÍA.....	89
ANEXOS.....	92

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composición Típica de ARD .....	31
Tabla 2. Tipos de tratamiento de aguas residuales.....	32
Tabla 3. Normas Nacionales Ambientales Vigentes.....	33
Tabla 4. Parámetros de diseño típicos para lagunas de estabilización .....	53
Tabla 5. Medición de Parámetros In-Situ. Entrada PTAR .....	66
Tabla 6. Medición de Parámetros In-Situ. Salida Humedal de Flujo Sub-Superficial.....	66
Tabla 7. Medición de Parámetros In-Situ. Salida Laguna de Maduración .....	67
Tabla 8. Resultados de Parámetros medidos en laboratorio y comparación con la norma .....	72
Tabla 9. Porcentajes de Eficiencia de Remoción .....	73
Tabla 10. Actividades de Mantenimiento y Operación consideradas como prioritarias ....	75
Tabla 11. Criterios de calidad establecidos para el uso de agua residual tratada para fines agrícolas.....	82

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Valores medidos de pH – Entrada PTAR.....	67
Gráfica 2. Valores medidos de pH – Salida Humedal de Flujo Sub-Superficial .....	68
Gráfica 3. Valores medidos de pH – Salida Laguna de Maduración .....	68
Gráfica 4. Valores medidos de Temperatura – Entrada PTAR .....	69
Gráfica 5. Valores medidos de Temperatura – Salida Humedal de Flujo Sub-Superficial	69
Gráfica 6. Valores medidos de Temperatura – Salida Laguna de Maduración.....	70
Gráfica 7. Valores medidos de Caudal – Entrada PTAR.....	70
Gráfica 8. Valores medidos de Caudal – Salida Humedal de Flujo Sub-Superficial .....	71
Gráfica 9. Valores medidos de Temperatura – Salida Laguna de Maduración.....	71

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Posición Geográfica, Municipio de Sotaquirá.....	25
Figura 2. Calidad Hídrica – Cuenca Alta del Río Chicamocha .....	27
Figura 3. Composición media de las aguas residuales domésticas .....	30
Figura 4. Vista General de la PTAR .....	35
Figura 5. Componentes de la PTAR del Municipio de Sotaquirá.....	36
Figura 6. Diagrama de líneas de flujo del sistema de tratamiento de aguas residuales....	37
Figura 7. Aliviadero PTAR Sotaquirá .....	39
Figura 8. Canal de Cribado PTAR Sotaquirá .....	41
Figura 9. Desarenador PTAR de Sotaquirá.....	42
Figura 10. Sedimentador Primario PTAR de Sotaquirá .....	43
Figura 11. Tanque Imhoff PTAR de Sotaquirá .....	44
Figura 12. Reactor UASB de la PTAR de Sotaquirá .....	46
Figura 13. Sistema de Humedal de Flujo Superficial.....	47
Figura 14. Sistema de Humedal de Flujo Sub-Superficial .....	48
Figura 15. Humedal de Flujo Superficial de la PTAR de Sotaquirá .....	49
Figura 16. Humedal de Flujo Sub-Superficial de la PTAR de Sotaquirá.....	49
Figura 17. Mecanismos de auto purificación en lagunas facultativas .....	52
Figura 18. Laguna Facultativa de la PTAR de Sotaquirá.....	52

Figura 19. Laguna de Maduración de la PTAR de Sotaquirá .....	54
Figura 20. Digestor de lodos de la PTAR de Sotaquirá .....	55
Figura 21. Lechos de Secado de la PTAR de Sotaquirá .....	56
Figura 22. Efluentes de la PTAR de Sotaquirá.....	56
Figura 23. Material Flotante – Canal de Cribado PTAR Sotaquirá .....	58
Figura 24. Material Flotante – Canal de Desarenador PTAR Sotaquirá .....	59
Figura 25. Material Flotante – Sedimentador Primario PTAR Sotaquirá.....	59
Figura 26. Nata Flotante – Tanque Imhoff PTAR Sotaquirá .....	60
Figura 27. Densidad Capa Vegetativa – Humedal de Flujo Superficial PTAR Sotaquirá ..	61
Figura 28. Material Sobrenadante en las Lagunas de Estabilización PTAR Sotaquirá .....	61
Figura 29. Trámites ante la autoridad ambiental por parte del Usuario Generador .....	80
Figura 30. Trámites ante la autoridad ambiental por parte del Usuario Receptor .....	81
Figura 31. Actividades de Prevención ante la autoridad ambiental por parte del Usuario Receptor .....	83

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO 1. Plano PTAR Sotaquirá .....	92
ANEXO 2. Especificaciones de Diseño PTAR .....	92
ANEXO 3. Reportes de Laboratorio .....	92

## GLOSARIO

**ACEITES Y GRASAS:** las grasas y aceites son compuestos orgánicos constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal y vegetal, así como los hidrocarburos del petróleo.

**AFLUENTE:** agua residual u otro líquido que ingrese a un reservorio o a algún proceso de tratamiento.

**AGUAS LLUVIAS:** aguas provenientes de la precipitación pluvial.

**AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS:** desechos líquidos provenientes de residencias, edificios, instituciones, y demás inmuebles de origen doméstico.

**ALCANTARILLADO DE AGUAS COMBINADAS:** sistema compuesto por todas las instalaciones destinadas a la recolección y transporte, tanto de las aguas residuales como de las aguas lluvias.

**AUTORIDAD AMBIENTAL (Artículo 1 Decreto 475 de 1998):** es la encargada de la vigilancia, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso, aprovechamiento y control de los recursos naturales renovables y del medio ambiente.

**CALIDAD DEL AGUA (Artículo 1 Decreto 475 de 1998):** conjunto de características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas propias del agua.

**CARACTERIZACION DE AGUAS RESIDUALES:** determinación de la cantidad y características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales.

**CAUDAL:** es el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo. Referido a un medidor, es el cociente obtenido entre el volumen de agua que circula a través de un medidor de agua y el tiempo que le toma hacerlo.

**CAUDAL DE DISEÑO:** caudal estimado con el cual se diseñan los equipos, dispositivos y estructuras de un sistema determinado.

**COLIFORMES:** la denominación genérica coliformes designa a un grupo de especies bacterianas que tienen ciertas características bioquímicas en común e importancia relevante como indicadores de contaminación del agua y los alimentos.

**CUERPO DE AGUA RECEPTOR:** cualquier masa de agua natural o de suelo que recibe la descarga del efluente final.

**DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO<sub>5</sub>):** cantidad de oxígeno usado en la estabilización de la materia orgánica carbonácea y nitrogenada por acción de los microorganismos en condiciones de tiempo y temperatura especificados (generalmente cinco días y 20°C). Mide indirectamente el contenido de materia orgánica biodegradable.

**DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO):** medida de la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación química de la materia orgánica del agua residual, usando como oxidantes sales inorgánicas de permanganato o dicromato en un ambiente ácido y a altas temperaturas.

**DESARENADOR:** la finalidad principal de esta estructura, es la retención de arenas, gravas, cenizas, y otros materiales que se sedimentan como pedazos de huesos, cáscaras de huevo, semillas, granos de maíz y café, que deben removerse para no obstruir y generar abrasión de tuberías, accesorios y válvulas del sistema de tratamiento.

**DESCOMPOSICION ANAEROBIA:** degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular por efecto de microorganismos. Usualmente va acompañada de la generación de ácidos y gas metano.

**EFLUENTE:** líquido que sale de un proceso de tratamiento.

**LAGUNA DE MADURACIÓN:** en general prosiguen de un proceso de laguna facultativa, están diseñadas principalmente para el tratamiento terciario, es decir para la eliminación de patógenos, nutrientes y posiblemente algas.

**LAGUNA FACULTATIVA:** es básicamente una cuenca usualmente excavada en la tierra e impermeabilizada, con el fin de dar tratamiento a las aguas residuales.

**LECHOS DE SECADO:** dispositivos que realizan el proceso de deshidratación de lodos para que puedan ser dispuestos y manejados como material sólido.

**LODO BIOLÓGICO:** lodo excedente que se genera en los procesos biológicos de las aguas residuales.

**MANTENIMIENTO:** conjunto de acciones que se ejecutan en las instalaciones y/o equipos para prevenir daños o para repararlos cuando se producen.

**MONITOREO:** actividad consistente en efectuar observaciones, indicadores y evaluaciones continuas en un sitio y periodo determinados, con el objeto de identificar los impactos y riesgos potenciales hacia el ambiente y la salud pública o para evaluar la efectividad del sistema de control.

**MUESTRA COMPUESTA:** es una muestra formada por un conjunto de dos o más submuestras, obtenidas a diversos intervalos de tiempo o de espacio del afluente o efluente. Cada submuestra corresponde a una porción del volumen a analizar, de tal forma que permite obtener información de los valores medios de los parámetros a determinar.

**PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL (PTAR):** conjunto de obras, instalaciones y procesos para tratar aguas residuales.

**PLANTA PILOTO:** 1. modelo para simular operaciones, procesos y condiciones hidráulicas de la planta de tratamiento, utilizando para este efecto el agua de la fuente de abastecimiento. 2. planta de tratamiento a escala laboratorio o técnica, que sirve para el estudio de la tratabilidad de un desecho líquido o la determinación de los parámetros de diseño del proceso.

**PRETRATAMIENTO:** proceso previo que tiene como objetivo remover el material orgánico e inorgánico flotante, suspendido o disuelto del agua antes del tratamiento secundario.

**REACTOR UASB:** en este reactor, el flujo se distribuye por un canal de entrada con vertederos individuales que llevan el agua residual hasta el fondo del tanque para que sea distribuida uniformemente, ascendiendo por la capa de lodos biológicos que digieren la carga orgánica produciendo biogás, el cual se encarga de generar la mezcla necesaria para que haya un buen contacto entre las aguas residuales y la biomasa. En el sentido vertical del tanque se establecen las fases sólido líquido-líquidos-gas en la parte superior del reactor UASB.

**REJILLA DE CRIBADO:** se emplea para la reducción de sólidos en suspensión de tamaños distintos. La distancia de las rejillas depende del objeto de las mismas.

**REÚSO:** el reúso de aguas residuales es una estrategia para el ahorro y uso eficiente del agua, fundamental para el desarrollo sostenible y enmarcada en el contexto de Gestión Integral del Recurso Hídrico.

**TRATAMIENTO ANAEROBIO:** estabilización de un desecho por acción de microorganismos en ausencia de oxígeno.

**TRATAMIENTO BIOLÓGICO:** procesos en los cuales se intensifican la acción natural de los microorganismos para estabilizar la materia orgánica presente. Usualmente se utilizan para la remoción de material orgánico disuelto.

**TRATAMIENTO PRELIMINAR:** este tratamiento permite retener al inicio de la planta materiales indeseables que dificultan los procesos físicos, químicos y biológicos posteriores y obstruyen y desgastan las instalaciones y equipos que conforman la planta.

**TRATAMIENTO PRIMARIO:** tratamiento en el que se remueve una porción de los sólidos suspendidos y de materia orgánica del agua residual. Esta remoción normalmente es realizada por opresiones físicas como la sedimentación. El efluente del tratamiento primario usualmente contiene alto contenido de materia orgánica biodegradable.

**TRATAMIENTO SECUNDARIO:** es aquel directamente encargado de la remoción de la materia orgánica y los sólidos suspendidos.

**SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES:** son el residuo no filtrable de una muestra de agua natural o residual industrial o doméstica, se definen como la porción de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio que posteriormente se seca a 103-105°C hasta peso constante.

**VERTIMIENTO (Artículo 3 Decreto 901 de 1997):** cualquier descarga final de un elemento, sustancia o compuesto, que esté contenido en líquido residual de cualquier origen, ya sea agrícola, minero, industrial de servicios, aguas negras o servidas, a un cuerpo de agua, canal, al suelo o al subsuelo.

## RESUMEN

### **TÍTULO: EVALUACIÓN TÉCNICA Y OPERATIVA DE LA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE SOTAQUIRÁ, BOYACÁ.\***

**Autores:** CASTRO BOHÓRQUEZ, Clara  
HERNÁNDEZ PERILLA, Juan Pablo\*\*

**Palabras Clave:** Evaluación, aguas residuales, Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), diagnóstico, optimización, Porcentaje de Remoción, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), Sólidos Suspendedos Totales (SST), Aceites y Grasas, Reúso.

La presente investigación da a conocer la evaluación técnica y operativa de la PTAR del Municipio de Sotaquirá (Boyacá). El documento contiene en primera instancia la descripción de las unidades de tratamiento existentes, así como las condiciones técnicas y de diseño para su operación. Posteriormente y por medio de una serie de visitas técnicas de inspección, indagación al personal encargado y revisión de documentación entregada por la Alcaldía y la Empresa de Servicios Públicos del Municipio, se procedió a realizar un diagnóstico al sistema de tratamiento con el fin de conocer las condiciones actuales de operación y mantenimiento del sistema e identificar posibles falencias y/o aspectos por mejorar; por lo anterior y con el objetivo de lograr una optimización en los procesos de tratamiento, un mejor manejo y control, se plantearon una serie de consideraciones y recomendaciones de carácter técnico y operativo.

Adicionalmente, y con el fin de conocer la eficiencia en términos de remoción en carga de DBO<sub>5</sub>, Aceites y Grasas, SST de cada tren de tratamiento existente en la PTAR, se realizó un monitoreo compuesto en la entrada y las salidas del sistema, obteniéndose porcentajes de remoción superiores al 80% para DBO<sub>5</sub> y Aceites y Grasas, respecto a los SST el porcentaje de remoción se mantuvo por debajo del 35%; no obstante se resaltó la necesidad de realizar monitoreos periódicos incluyendo todos los parámetros establecidos en la Resolución 0631/2015, artículo 8.

Igualmente, se identificaron los criterios requeridos dentro del marco normativo de reúso de aguas residuales tratadas como alternativa de aprovechamiento posterior del recurso y se concluyó que para determinar la viabilidad de reutilización del agua para fines agrícolas, es necesario realizar un análisis fisicoquímico y microbiológico de los efluentes, incluyendo la totalidad de los parámetros regulados en la Resolución 1207/2014.

## SUMMARY

---

\* Trabajo de grado

\*\* Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental. Director: Ing. Richard Díaz Guerrero.

# **TITLE: TECHNICAL AND OPERATIONAL EVALUATION OF THE PILOT PLANT FOR WASTEWATER TREATMENT OF THE MUNICIPALITY OF SOTAQUIRÁ, BOYACÁ.\***

Authors: CASTRO BOHÓRQUEZ, Clara Esperanza  
HERNÁNDEZ PERILLA, Juan Pablo \*\*

Key words: Evaluation, waste water, Residual Water Treatment Plant (RWTP), diagnosis, optimization, Percentage of Removal, Chemical Demand of Oxygen (DQO), Biochemical Demand of Oxygen (DBO5), Solid Suspended Total (SST), Oils and Fats, Reuse.

The present investigation announces the technical and operative evaluation of the RWTP of Sotaquirá's Municipality (Boyacá). The document contains in the first instance the description of the existing units of treatment, as well as the technical conditions and of design for his operation. Later and by means of a series of technical visits of inspection, investigation to the in charge personnel and review of documentation delivered by the Mayoralty and the Public utility company of the Municipality, one proceeded to realize a diagnosis to the system of treatment in order to know the current conditions of operation and maintenance of the system and to identify possible failings and / or aspects for improving; for the previous thing and with the aim to achieve an optimization in the processes of treatment, a better managing and control, there appeared a series of considerations and recommendations of technical and operative character.

Additional, and in order knew the efficiency in terms of removal in load of DBO5, Oils and Fats, SST of every train of existing treatment in the RWTP, there were realized a monitoring composed in the entry and the exits of the system, there being obtained percentages of removal superior to 80 % for DBO5 and Oils and Fats, with regard to the SST the percentage of removal was kept below 35 %; nevertheless there was highlighted the need to realize periodic monitorings including all the parameters established in the Resolution 0631/2015, article 8.

Equally, there were identified the criteria needed inside the normative frame of reúso of waste water treated as alternative of later utilization of the resource and one concluded that to determine the viability of reutilization of the water for agricultural ends, it is necessary to realize a physicochemical and microbiological analysis of the effluent ones, including the totality of the parameters regulated in the Resolution 1207/2014.

---

\* Thesis

\*\* Chemical Enginner School. Enviromental Enginner Especialist. Director: Eng. Richard Díaz

## INTRODUCCIÓN

Los Municipios Colombianos como consecuencia de la descentralización administrativa, han venido adquiriendo una mayor responsabilidad en la gestión para orientar su desarrollo socioeconómico y ambiental. Aunque los recursos económicos propios y de la nación son el eje de dicha gestión, también lo son los instrumentos procedimentales y normativos con que cuentan las administraciones municipales para realizar una labor eficiente.

Una de las problemáticas ambientales que se ha intensificado durante los últimos años y que exige de una acción inmediata por parte de los municipios, es la contaminación del recurso hídrico, generada por las aguas residuales municipales. Sólo el 22% de los municipios del país realizan un tratamiento de sus aguas residuales, un porcentaje realmente bajo si consideramos que tampoco se ha reportado una aceptable eficiencia y operación de la mayoría de estas plantas de tratamiento<sup>1</sup>.

Pero la gestión para el Manejo y Tratamiento de las Aguas Residuales no se reduce simplemente al tratamiento de los vertimientos del alcantarillado municipal, debe trascender a una gestión más integral reflejada en la reducción de cantidad de vertimientos, control de la calidad de los mismos, ampliación de la cobertura, formulación de planes maestros de saneamiento, gestión de los proyectos de inversión, construcción de la infraestructura de tratamiento adecuada, seguimiento sanitario y ambiental (como control interno municipal y como requerimiento de la autoridad ambiental competente), programas de educación ambiental, entre otros.

Por lo anterior, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT, considera que es importante fortalecer la gestión del recurso hídrico en los

---

<sup>1</sup> Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT. Guía Práctica de Formulación de Proyectos de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Municipales. Colombia, 2002, 40 p.

municipios (Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales en Colombia), ésta gestión se pretende materializar por medio de la consolidación de la información a nivel nacional en materia de manejo y tratamiento de aguas residuales en centros urbanos de los municipios colombianos y en base a esto, establecer programas que sirvan como herramienta y guía, enfocados en la toma de decisiones en los procesos de planificación y control.

## **1. JUSTIFICACIÓN**

Actualmente el recurso hídrico está siendo altamente contaminado en su mayor parte por vertimientos de origen doméstico e industrial, pues se ha ido acentuando la contaminación en la mayoría de las fuentes de agua disponibles, especialmente superficiales. Por lo anteriormente mencionado, surge la necesidad de tratar las aguas residuales, desarrollando sistemas de tratamiento sostenibles en el tiempo que permitan la conservación del medio ambiente, además de disminuir los impactos generados al recurso hídrico y a la salud de las personas.

Por lo anterior el Municipio de Sotaquirá, buscó iniciar el proyecto de construcción y puesta en marcha de la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), la cual se construyó con el objeto de reducir o corregir algunas características indeseables, de tal forma que su posible reúso o disposición final cumplan con la normatividad ambiental vigente, dicho propósito fue posible mediante el convenio interinstitucional entre la Universidad de Boyacá, la Corporación Autónoma Regional de Boyacá y el Municipio de Sotaquirá, lo anterior debido a que el Municipio no contaba con la capacidad técnica y administrativa para llevar a cabo la implementación del proyecto de manera independiente.

En consecuencia, durante el desarrollo del presente proyecto de investigación se dará a conocer la evaluación técnica y operativa de la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales del municipio, lo anterior se realizará tomando como referencia los parámetros de diseño con los que se construyó la Planta de

Tratamiento y compararlos con las condiciones actuales de caudal, eficiencia, operación y características del agua a tratar. De igual forma, se realizará una identificación de los criterios requeridos dentro del marco normativo para reúso de aguas residuales tratadas, como alternativa de estudiar la viabilidad del aprovechamiento posterior del recurso

## **2. GENERALIDADES**

### **2.1. Aspectos Generales del Municipio de Sotaquirá**

El Municipio de Sotaquirá, se encuentra situado en el Departamento de Boyacá, Provincia del Centro, al noroeste de la ciudad de Tunja a una distancia de 39 Km, el Municipio cuenta con una extensión de 288,65 Km<sup>2</sup>, está ubicado a 2.860 m.s.n.m., con una temperatura promedio de 14°C.

El Municipio limita por el oriente con el municipio de Tuta, por el norte con el municipio de Paipa, por el occidente con el municipio de Gámbita (Santander) y por el sur con el Municipio de Cómbita<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> ALCALDÍA DE SOTAQUIRÁ – BOYACÁ. [En línea]. [27 de agosto de 2017]. Disponible en: ([http://www.sotaquira-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.sotaquira-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml)).

**Figura 1.** Posición Geográfica, Municipio de Sotaquirá



**Fuente:** ALCALDÍA DE SOTAQUIRÁ – BOYACÁ. [En línea]. [27 de agosto de 2017]. Disponible en: (<http://www.sotaquirá-boyacá.gov.co/index.shtml#8>).

El sector urbano del municipio, tiene una extensión aproximadamente de 0,1 Km<sup>2</sup>, dividido en manzanas. En el perímetro urbano se encuentran ubicadas las instalaciones de la administración municipal y demás dependencias del orden regional, departamental y nacional, encargadas de prestar los diferentes servicios públicos a toda la población. El área rural contempla el 99,97% de la extensión total de la población.

**2.1.1 Características Físicas del Territorio** El Municipio de Sotaquirá presenta tres (3) zonas bien definidas: zonas planas o valle, las zonas altas y quebradas y las zonas de páramo. La primera, llamada Valle de Sotaquirá es de origen fluvio lacustre, la explotación base es la ganadería.

Las zonas altas y quebradas, están constituidas por relieve ondulado, quebrado y muy quebrado donde la geomorfología no presenta efectos claros de la influencia del paisaje; allí predomina la ganadería de doble utilidad, alternada con la

agricultura en la cual sobresalen cultivos de papa, arveja, tomate de árbol, feijoa y cebada.

En la zona alta del páramo, predominan algunos bosques nativos y rastrojos que alguna vez fueron bosques densos, son zonas de recarga hídrica. El municipio cuenta con una importante red hídrica que lo hace un rincón verde de Boyacá; sobresalen los ríos de Piedras, Ocusá, Sotaquirá, Vargas y tres (3) lagunas de origen glacial ubicadas sobre los 3.400 m.s.n.m.

**2.1.2 Hidrografía:** La red hidrográfica del municipio, está constituida por la cuenca del Río Suárez y la cuenca alta del Río Chicamocha, los cuales se unen más adelante en el Departamento de Santander para conformar el Río Sogamoso que vierte sus aguas posteriormente al Río Magdalena.

El Río Chicamocha posee una cuenca de 10.332 Km<sup>2</sup>, hasta su confluencia con el Río Suárez. Ambos se reúnen para formar el Río Sogamoso. La cuenca alta del Río Chicamocha se localiza en el sector central del Departamento de Boyacá. En un área de 2.200 Km<sup>2</sup> comprende territorios de 21 municipios en la región del altiplano de Tundama y Sugamuxi principalmente (Tunja, Soracá, Motavita, Chivatá, Cómbita, Oicatá, Siachoque, Toca, Tuta, Sotaquirá, Paipa, Duitama, Santa Rosa, Tibasosa, Firavitoba, Pesca, Iza, Nobsa, Tota, Cuítiva, y Sogamoso)<sup>3</sup>.

La red principal de corrientes está conformada por el Río Chicamocha y sus afluentes principales (Jordán, La Vega, Tuta, Sotaquirá, Piedras, Surba y Chiticuy), y un conjunto de estructuras artificiales de drenaje y almacenamiento hasta la localidad de Vado Castro.

---

<sup>3</sup> CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE BOYACÁ – CORPOBOYACÁ. Implementación de Tasas Retributivas por Vertimientos Puntuales, Determinación de la Meta Global de Descontaminación – Cuenca Alta del Río Chicamocha. Informe Técnico Consejo Directivo. Noviembre de 2009, p 16.

Este sistema soporta cuantiosas demandas para diversos usos (agrícola y pecuario, consumo humano y doméstico en algunos municipios, industrial y recepción y transporte de aguas residuales) y sufre impactos significativos de las actividades sociales y económicas.

Los criterios de calidad de la Cuenca Alta del Río Chicamocha, establecidos por la Corporación Autónoma Regional de Boyacá, se observan en la siguiente figura.

**Figura 2.** Calidad Hídrica – Cuenca Alta del Río Chicamocha



**Fuente:** CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE BOYACÁ – CORPOBOYACÁ. Implementación de Tasas Retributivas por Vertimientos Puntuales, Determinación de la Meta Global de Descontaminación – Cuenca Alta del Río Chicamocha. Informe Técnico Consejo Directivo. Noviembre de 2009, p 19.

**2.1.3. Riesgos Naturales y Amenazas:** El Esquema de Ordenamiento Territorial define que existen amenazas de tipo antrópico, natural y geológico, los cuales se deben tener en cuenta en el momento de desarrollar planes de control y manejo que permitan mitigar el impacto ambiental negativo ocasionado, mejorando las condiciones de vida de las personas directamente afectadas.

- Amenazas Naturales de Geodinámica Exógena: Dentro de éstas, se pueden resaltar las amenazas ocasionadas por inestabilidad de laderas, que se refieren a las zonas o áreas que están o pueden ser afectadas por movimientos de tierra y procesos de erosión acelerada o zonas susceptibles a estos procesos, de acuerdo a sus magnitudes y frecuencias.
- Amenazas asociadas a Fenómenos de Inundación: En épocas de alta lluviosidad, especialmente en la zona de valle y aledaño a los Ríos Ocusá y Sotaquirá, puede presentarse inundación de estas tierras, debido al rebose del nivel de los ríos señalados.
- Amenazas de origen antrópico: El hombre con su accionar diario, principalmente con la inclusión de cultivo en áreas de páramo, provoca incendios forestales en época de verano que pueden extenderse a grandes áreas, tal como ha sucedido en los últimos años.

**2.1.5. Contexto Demográfico** El Municipio de Sotaquirá, para el año 2015 cuenta con 7.709 habitantes según las proyecciones del Departamento Administrativo de Estadísticas – DANE, que corresponde a 0,6% de la población del Departamento de Boyacá. Según la distribución porcentual de habitantes por área de residencia, se observa que el 90,7% (6993 Habitantes) se encuentra ubicada en el área rural, la cual es agrícola y ganadera por excelencia y el 9,3% (716 Habitantes) se encuentra ubicada en el área urbana.

**2.1.4. Clima:** El clima de Sotaquirá es semihúmedo, húmedo y seco frío. El relieve es el único factor determinante de las variaciones en el clima de Sotaquirá. La temperatura media del Municipio de Sotaquirá es de 14°C

**2.1.5. Contexto Demográfico:** El Municipio de Sotaquirá, para el año 2015 cuenta con 7.709 habitantes según las proyecciones del Departamento Administrativo de Estadísticas – DANE, que corresponde a 0,6% de la población del Departamento de Boyacá. Según la distribución porcentual de habitantes por área de residencia, se observa que el 90,7% (6993 Habitantes) se encuentra ubicada en el área rural, la cual es agrícola y ganadera por excelencia y el 9,3% (716 Habitantes) se encuentra ubicada en el área urbana.

## **2.2. Tratamiento de Aguas Residuales Municipales**

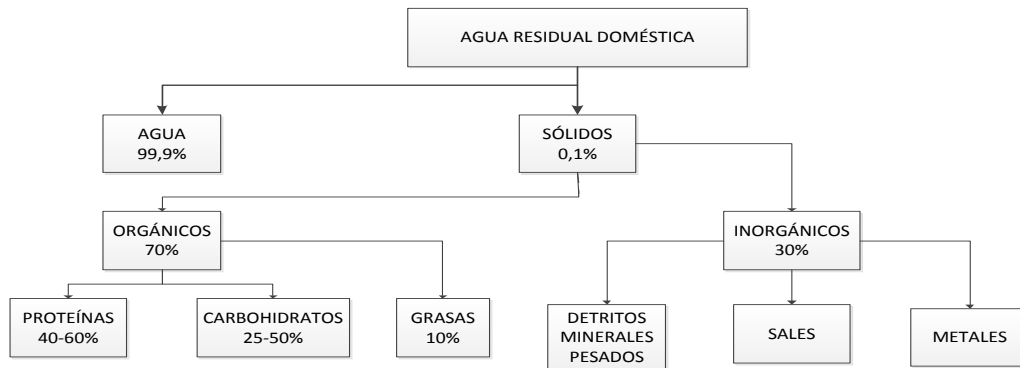
La responsabilidad por el tratamiento de las aguas residuales domésticas, por ser una actividad complementaria del servicio público de alcantarillado, es de las administraciones municipales, de forma que éstas deben velar por la disminución del impacto sobre el medio ambiente, encargándose directamente o a través de las entidades prestadoras de los servicios públicos, de la construcción y operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento y disposición adecuada de las aguas residuales domésticas.

Las aguas residuales son aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias, siendo recogidas por la red de alcantarillado que las conducirá hacia un destino apropiado. Según su origen, las aguas provienen de residencias, oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con los residuos de algunas industrias y de actividades agrícolas, así como de las

aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que también pueden agregarse eventualmente al agua.<sup>4</sup>

Las aguas residuales domésticas se generan a partir de distintas fuentes. Algunas de sus características se presentan en la Figura 3 y en la Tabla 1.

**Figura 3.** Composición media de las aguas residuales domésticas



**Fuente:** METCALF Y EDDY, Inc., Ingeniería Sanitaria, Redes de Alcantarillado y Bombeo de Aguas Residuales, Barcelona, Editorial Labor, S.A., Primera edición, 1985. p. 249-254.

---

<sup>4</sup> ROLIM MENDONÇA, Sergio. Sistemas de tratamiento de aguas en procesos anaerobios. Sao Paulo, 1999, 30 p. Trabajo de Grado (Ingeniero Civil). Escuela de Ingeniería de la Universidad de Paraíba. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil.

**Tabla 1.** Composición Típica de ARD

COMPONENTE	CONCENTRACION ALTA	CONCENTRACION MEDIA	CONCENTRACION BAJA
<b>Sólidos Totales</b>	1000	500	200
<b>Sólidos Suspendedos</b>	5000	300	100
<b>Sólidos Sedimentables</b>	12	8	4
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)</b>	300	200	100
<b>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</b>	1000	500	250
<b>Nitrógeno Total</b>	80	50	25
<b>Fósforo total</b>	20	15	5
<b>Grasas y Aceites</b>	40	20	0

**Nota:** Las unidades de medida son en mg/L

**Fuente:** Ibíd., p. 31.

**2.2.1. Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR):** Una PTAR es un conjunto de procesos y operaciones unitarias que se realizan en una estructura adecuada para que por medios físicos, químicos y biológicos se remuevan contaminantes no deseables. El objetivo de una PTAR doméstica es el de reducir la cantidad de contaminantes presentes en el agua, a tal nivel que el agua pueda ser vertida nuevamente a cuerpos de agua receptores, sin el perjuicio de afectar el medio acuático y la capacidad autodepuradora del sistema.

**2.2.1.1. Tipos de tratamiento de aguas residuales** Las características presentadas por las aguas residuales de una comunidad, como la presencia de sólidos gruesos y partículas abrasivas, hacen necesaria la utilización de unidades de tratamiento preliminar y primario de dispositivos de retención, remoción y/o trituración, antes del inicio del tratamiento secundario para llevar a cabo un adecuado tratamiento y cumplir con los requerimientos establecidos, en la Tabla 2, se describe cada uno de los tratamientos.

**Tabla 2.** Tipos de tratamiento de aguas residuales

Tipo de Tratamiento	Características
<b>Tratamiento Preliminar</b>	Estos permiten aumentar la efectividad en los procesos posteriores, tienen como objetivo remover objetos grandes y abrasivos. Entre las estructuras de tratamiento preliminar se caracterizan las rejillas o tamices, desarenadores y tanques de igualación u homogenización.
<b>Tratamiento Primario</b>	Permiten remover principalmente los contaminantes sedimentables, algunos sólidos suspendidos y flotantes a través de procesos físicos y en algunos casos químicos. Pueden remover desde 40 a 55% de los sólidos en suspensión (SST) y de 25 a 35% de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ). Entre las estructuras de tratamiento primario se caracterizan los sedimentadores, los tanques de flotación, tanques imhoff y tanques de precipitación química.
<b>Tratamiento Secundario</b>	Permiten remover la materia orgánica soluble y suspendida mediante procesos biológicos (acción de microorganismos), pueden remover hasta 85% de la DBO soluble que se escapa del tratamiento primario, cantidades adicionales de los sólidos suspendidos además de cantidades variables de nitrógeno, fósforo, metales pesados y bacterias patógenas. En el tratamiento secundario de tipo biológico, la materia orgánica es utilizada como alimento de los microorganismos tales como hongos, bacterias, protozoos, rotíferos, etc.; por lo anterior, es necesario mantener los niveles de Oxígeno ó DBO y ciertas condiciones favorables como el pH y un adecuado tiempo de contacto. Las estructuras de tratamiento secundario más comunes son: Lagunas de Estabilización, Lodos Activados Convencionales y modificados, Filtros Percoladores y Anaeróbicos, Reactores anaeróbicos de flujo ascendente, Biodiscos, entre otros.
<b>Tratamiento Terciario o Avanzado</b>	Los tratamientos terciarios o avanzados, permiten obtener una calidad de efluente mejor que la lograda en los tratamientos primarios y secundarios convencionales. Con tratamientos terciarios se logra mejorar la remoción de DBO <sub>5</sub> , DQO, SST y nutrientes o remover contaminantes disueltos, coloidales, que no han sido removidos en los tratamientos previos. Los tratamientos terciarios son más costosos que los tratamientos secundarios y primarios, dentro de las operaciones unitarias se encuentran: Coagulación/Floculación, Filtración en medio granular o uso de membranas (ósmosis inversa, nanofiltración, ultrafiltración, microfiltración, electrodiálisis), Intercambio Iónico, Adsorción, Oxidación Química, Incineración, arrastre por vapor de agua o aire, etc.

**Fuente:** Íbid 2014, p. 31.

**2.2.2. Marco Legal:** El marco legal de los parámetros de calidad de agua establece leyes, decretos, resoluciones y reglamentos técnicos de normatividad y manejo de aguas con los cuales se busca controlar la contaminación hídrica. En la Tabla 3, se establece la normatividad aplicable en materia de calidad de agua, requisitos y demás factores legales para las fases de construcción, puesta en marcha y operación de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales.

**Tabla 3. Normas Nacionales Ambientales Vigentes**

NORMA	RESUMEN	ENTIDAD
Decreto Ley 2811 de 1974	Dicta el Código Nacional de Recursos Renovables y de Protección del Medio Ambiente.	Presidencia de la República
Decreto 1594 de 1984	Reglamento usos del agua y residuos líquidos. Derogado por el Decreto 3930 de 2010, quedando vigentes transitoriamente los artículos 37 a 48, 72 a 79, 155, 156, 158, 160 y 161, hasta tanto el Ministerio de Ambiente expida las correspondientes regulaciones.	Presidencia de la República
Resolución 1096 de 2000	Tiene por objeto señalar los requisitos técnicos que deben cumplir los diseños, las obras y procedimientos correspondientes al sector de Agua Potable y Saneamientos Básico y sus actividades complementarias. Señaladas en el artículo 14, numerales 14.19, 14.22, 14.23 y 14.24 de la Ley 142 de 1994, que adelanten las entidades prestadoras de servicios públicos municipales de acueducto, alcantarillado y aseo o quien haga sus veces.	Ministerio de Desarrollo Económico
Resolución 1433 de 2004	Reglamente el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos como parte de la Licencia Ambiental.	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT
Decreto 3930 de 2010	Reglamenta Usos del Agua y residuos líquidos.	Presidencia de la República

NORMA	RESUMEN	ENTIDAD
Decreto 4728 de 2010	Modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010, frente a la norma de vertimientos, protocolos de monitoreo de vertimientos y planes de cumplimiento.	Presidencia de la República
Decreto 2667 de 2012	Tasa retributiva por vertimientos puntuales	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS
Decreto 1287 de 2014	Uso de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio
Resolución 1207 de 2014	Uso de aguas residuales tratadas	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS
Resolución 0631 de 2015	Se establecen los parámetros y valores límite permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS
Decreto 1076 de 2015	Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible	Presidencia de la República
El Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento (RAS)	Fija los criterios básicos y requisitos mínimos que deben reunir los diferentes procesos involucrados en la conceptualización, diseño, construcción, supervisión técnica, puesta en marcha, operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales entre otras obras de agua potable y saneamiento básico.	Ministerio de Desarrollo Económico

### **3. RECONOCIMIENTO DE LA PLANTA Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO**

#### **3.1. Reconocimiento de la PTAR**

Para el reconocimiento de la PTAR del Municipio de Sotaquirá, se realizó una serie de visitas previas, donde se identificaron las diferentes estructuras de tratamiento y se determinó su estado actual; así mismo, se identificaron los procesos unitarios

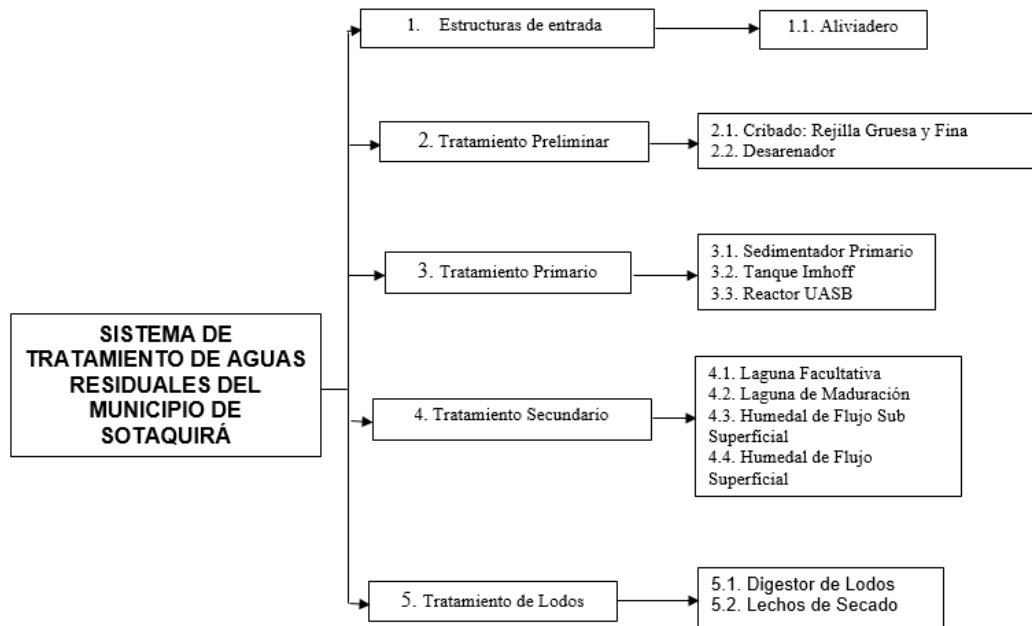
y las líneas de entrada y salida de agua residual tratada. En la Figura 4, se muestra la vista general de la PTAR del Municipio de Sotaquirá.

**Figura 4.** Vista General de la PTAR



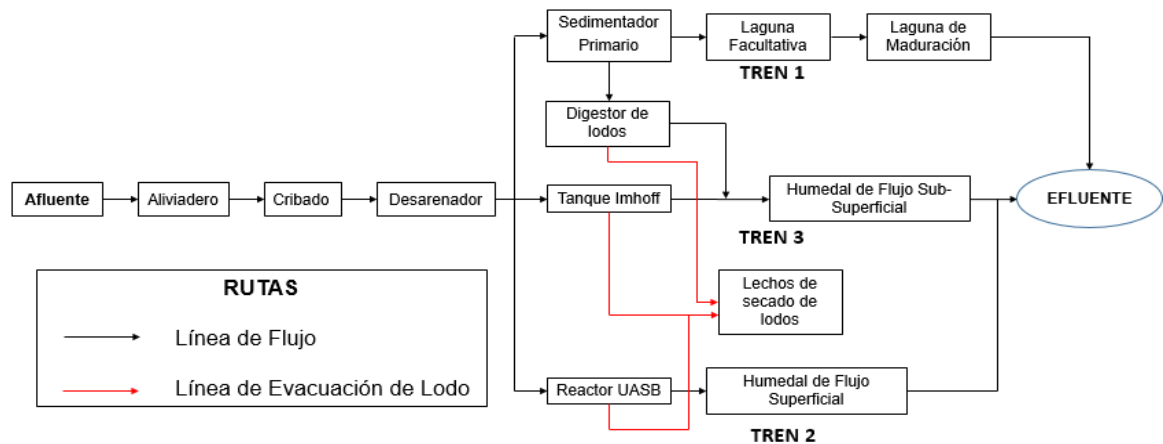
Por lo anterior se pudo deducir que el sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio se encuentra constituido por diferentes sistemas físicos y biológicos, los cuales tienen como principal objetivo, transformar la materia orgánica. En la Figura 5, se presentan los componentes de la PTAR del Municipio de Sotaquirá.

**Figura 5.** Componentes de la PTAR del Municipio de Sotaquirá



Además se identificó que la PTAR del Municipio se construyó implementando tres (3) líneas de tratamiento con la idea de servir como ejemplo para los Municipios del Departamento de Boyacá con características similares al Municipio de Sotaquirá. Las líneas de tratamiento están compuestas por diferentes unidades, de tipo primario y secundario lo cual se evidencia en la Figura 6.

**Figura 6.** Diagrama de líneas de flujo del sistema de tratamiento de aguas residuales



En el Anexo 1, se presenta el plano que contiene el diseño general de la PTAR, donde se observa cada tren de tratamiento con las líneas de flujo propuestas para la misma, éste fue obtenido con el convenio interadministrativo 090 con la Corporación Autónoma Regional de Boyacá – Corpoboyacá.

### 3.2. Descripción del Sistema de Tratamiento

La Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Sotaquirá inició su funcionamiento en el año 2011 y recibe las aguas provenientes del casco urbano, el cual consta según el último censo realizado de aproximadamente 716 habitantes, funciona por gravedad y se compone de las siguientes estructuras o tratamientos:

- Pretratamiento: Aliviadero, canal de cribado y desarenador.
- Tratamiento por cada unidad de cada tren de tratamiento (3 trenes que captan 1/3 del caudal de diseño). **Tren 1:** Sedimentador Primario (Digestor), laguna facultativa, laguna de maduración. **Tren 2:** Reactor UASB, Humedal de Flujo Superficial. **Tren 3:** Tanque Imhoff, Humedal de Flujo Subsuperficial

y para el tratamiento de lodos, se tiene el Digestor de Lodos y Lechos de Secado.

Es importante mencionar que el afluente de la PTAR, es procedente de actividades residenciales, instituciones públicas, instalaciones de locales comerciales y aguas pluviales.

### **3.2.1 Estructura de entrada**

- Aliviadero: un aliviadero se define como una estructura diseñada en colectores combinados, con el propósito de separar los caudales que exceden la capacidad del sistema y conducirlos a un sistema de drenaje de aguas lluvias<sup>5</sup>.

El aliviadero dispuesto en la PTAR del Municipio de Sotaquirá es de tipo lateral alto, denominado así por la cresta del vertedero que se encuentra localizada en un nivel superior a la horizontal del diámetro conducto de entrada<sup>6</sup>, como se observa en la siguiente figura.

---

<sup>5</sup> MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Reglamento Técnico de Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2000. Título A-12 Definiciones. 2012. p 110.

<sup>6</sup> SCOTT, John S. Dictionary of water and waste management Second Ed. [En línea]. [29 de agosto de 2017]: Disponible en: (<http://globalspec.com/reference/23719/203279/side-channel-spillway-SLO>).

**Figura 7.** Aliviadero PTAR Sotaquirá



El caudal medio diario es de aproximadamente 1,55 L/s, caudal que se sitúa por debajo del caudal de diseño (6,8 L/s). En base con lo mencionado anteriormente y teniendo en cuenta que la PTAR contiene tres (3) trenes de tratamiento distintos el caudal a ingresar a cada tren de tratamiento es  $1/3$  del caudal medio diario (0,52 L/s), en el Anexo 2 se presenta el cálculo de los parámetros de diseño de la Planta Piloto de Aguas Residuales del Municipio de Sotaquirá, efectuado por la Corporación Autónoma Regional de Boyacá – Corpoboyacá.

**3.3. Tratamiento Preliminar del Sistema** Los pre-tratamientos buscan una calidad del agua apropiada a las necesidades de los tratamientos precedentes, comprenden un cierto número de operaciones mecánicas, físicas y/o químicas, que tienen por objeto separar el agua de la mayor cantidad posible de materias que por su naturaleza o tamaño, puedan ocasionar problemas en el tratamiento posterior.

Dentro de las estructuras de tratamiento preliminar se caracterizan las rejillas y el desarenador, los cuales tienen como objetivo remover objetos grandes y abrasivos<sup>7</sup>.

- Rejillas: Su principal objetivo es el de retener el material sólido grueso y en general todos aquellos materiales que puedan llegar a presentar riesgo para el correcto funcionamiento de válvulas, tuberías y los procesos posteriores. Una rejilla consta de un sistema de barras paralelas, inclinadas o verticales, igualmente espaciadas y colocadas en la sección transversal del canal que conduce las aguas residuales a la planta de tratamiento<sup>8</sup>.

El cribado de la PTAR del Municipio de Sotaquirá, se compone de dos (2) rejillas de limpieza manual; la primera denominada rejilla gruesa (espaciamiento entre barras de 40 mm) y la segunda rejilla fina (espaciamiento entre barras de 20 mm). Consta además de dos (2) bandejas localizadas en la parte superior de las rejillas, las cuales se emplean para el secado del material removido durante el mantenimiento, ver Figura 8.

---

<sup>7</sup> OROZCO JARAMILLO. Álvaro y SALAZAR ARIAS. Álvaro. Tratamiento biológico de las aguas residuales. Ed. 2. Medellín: Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería Sanitaria. Mayo 1987. 33 p. ISBN958-921-16-6.

<sup>8</sup> SCOTT, John S. Dictionary of water and waste management Second Ed. [En línea]. [s.p.i]: Disponible en: (<http://globalspec.com/reference/23719/203279/side-channel-spillway-SLO>).

**Figura 8.** Canal de Cribado PTAR Sotaquirá



- Desarenador: Su propósito es sedimentar partículas discretas que son de tipo inorgánico con gravedad específica mayor o igual a  $2,65 \text{ g/cm}^3$ . Estas estructuras constan de varios canales, los cuales son paralelos, en donde se reduce la velocidad para facilitar la sedimentación de las partículas inorgánicas; generalmente, se diseña más de un desarenador para que siempre quede como mínimo una (1) unidad de servicio para limpieza y reparaciones.

La PTAR del Municipio de Sotaquirá tiene dos (2) canales desarenadores, uno para operación y el otro de reserva. Su mantenimiento es de tipo manual. Las dimensiones de los canales son: Largo 3 metros, Ancho 0,6 metros, Profundidad 2,0 metros, con un borde libre de 0,2 metros y una altura de arena de 1,3 metros. Ver Figura 9.

**Figura 9.** Desarenador PTAR de Sotaquirá



La pantalla deflectora separa la zona de entrada al desarenador y la zona de sedimentación del mismo, en ella se realizan orificios, a través de los cuales el agua pasa con un régimen de velocidades adecuado para que ocurra la sedimentación. Los orificios de la pantalla deflectora son circulares, la función principal de la pantalla es regular el flujo para que sea uniforme.

**3.3.1 Tratamiento Primario** El principal objetivo de un tratamiento primario es el de remover aquellos contaminantes que puedan sedimentarse, como por ejemplo los sólidos sedimentables y algunos suspendidos. Este tratamiento, remueve cerca de un 60% en sólidos suspendidos y un 35% de la DBO<sub>5</sub> presente en el agua residual. Los compuestos solubles no pueden ser eliminados por este tipo de tratamiento.

El tratamiento primario presenta diferentes alternativas según la configuración general y el tipo de tratamiento que se adopte, por lo que entre las estructuras de este tratamiento se pueden encontrar los Sedimentadores Primarios, los Tanques Imhoff y los Reactores UASB.

**3.3.1.1. Sedimentador Primario:** La sedimentación primaria es una operación unitaria diseñada para remover los sólidos suspendidos sedimentables de las aguas residuales<sup>9</sup>.

Estos tanques pueden ser de tipo rectangular o cilíndrico. En la sedimentación primaria, los lodos producidos están conformados por partículas orgánicas crudas que deben ser llevadas al digester de lodos.

Un tanque sedimentador primario tiene profundidades que oscilan entre 3 y 4 metros y los tiempos de retención hidráulica de 2 a 3 horas. En estos tanques, el agua residual es sometida a condiciones de reposo para facilitar la sedimentación de los sólidos suspendidos.

Ésta estructura en la PTAR del Municipio de Sotaquirá, tiene una carga hidráulica superficial de  $20 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ día}$ , el área superficial es de  $3,46 \text{ m}^2$ . El sedimentador es un tanque circular con diámetro de 2,1 metros, la profundidad es de 2 metros y tiempo de retención hidráulico de 2,4 horas.

**Figura 10.** Sedimentador Primario PTAR de Sotaquirá



---

<sup>9</sup> TCHOBANOGLUS, G., Sistema de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados, 2000. p. 300-313.

**3.3.1.2. Tanque Imhoff** : Estas estructuras son empleadas con el fin de efectuar simultáneamente la sedimentación y digestión anaerobia de los sólidos que sedimentan. Constan de una cámara superior de sedimentación con forma cónica, sobre las paredes de estos compartimientos ruedan los sólidos que pasan por una abertura a un compartimiento inferior, donde se realiza la digestión anaerobia. Los tiempos de retención promedio son de 2 a 3 horas. El compartimiento de digestión debe tener una capacidad de almacenamiento de lodos de unos seis (6) meses.

La PTAR del Municipio de Sotaquirá, el tanque Imhoff tiene un tiempo de retención hidráulico de 3 horas, el volumen de la zona de sedimentación es de  $14,5 \text{ m}^3$ , el área superficial es de  $4,63 \text{ m}^2$ . Las dimensiones son Largo 3,1 m, ancho 1,52 m.

**Figura 11.** Tanque Imhoff PTAR de Sotaquirá



**3.3.1.3. Reactor UASB** El reactor anaerobio de manto de lodos de flujo ascendente, es una tecnología desarrollada originalmente en Holanda, se emplea normalmente en aguas residuales de origen doméstico y en climas templados<sup>10</sup>.

La operación de los reactores UASB se basa en la actividad de diferentes grupos de bacterias que degradan la materia orgánica y se desarrollan en forma interactiva,

---

<sup>10</sup> HASKONING, Decom. Manual for UASB reactors for domestic wastewater under tropical conditions. 1989. p. 11-12.

formando lodo biológicamente activo en el reactor. Los costos de operación del reactor son bajos ya que no requiere de oxígeno; Sin embargo, se debe tener control en diferentes parámetros como pH, temperatura, el proceso de arranque es lento y si éste no es controlado, se generaría un alto porcentaje de malos olores.

Para el caso del Municipio de Sotaquirá, el arranque del reactor se llevó a cabo sin lodo de semilla como inóculo, ya que para el caso de aguas residuales domésticas, ésta forma de arranque es posible<sup>11</sup>.

El reactor UASB de la PTAR del Municipio de Sotaquirá como en la clásica configuración presenta dos (2) zonas bien definidas, la primera es la zona de separación de fases llamado separador Gas-Líquido-Sólido (GLS), que funciona como sedimentador y recolector de biogás, la segunda es la zona de digestión en la que se encuentra localizado el manto de lodos. El volumen del reactor UASB es de 23 m<sup>3</sup>, una altura de 4,5 m, el área superficial es de 5,12 m<sup>2</sup>. En la Figura 12, se observan las condiciones en las que se encontraba el Reactor UASB en su etapa de arranque (Fotografía lado izquierdo) y las condiciones actuales del mismo (Fotografía lado derecho). Este escenario de corrosión en las estructuras metálicas del reactor se debe principalmente a las emisiones de biogás, producto de la digestión anaerobia de la materia orgánica en el interior de esta unidad de tratamiento.

---

<sup>11</sup> SCHELLINKHOUT, A., COLLAZOS, C.J. Full scale application of the UASB technology for sewage treatment. Water Science and Technology, 1992 .p 159-66.

**Figura 12.** Reactor UASB de la PTAR de Sotaquirá



### **3.3.2 Tratamiento Secundario**

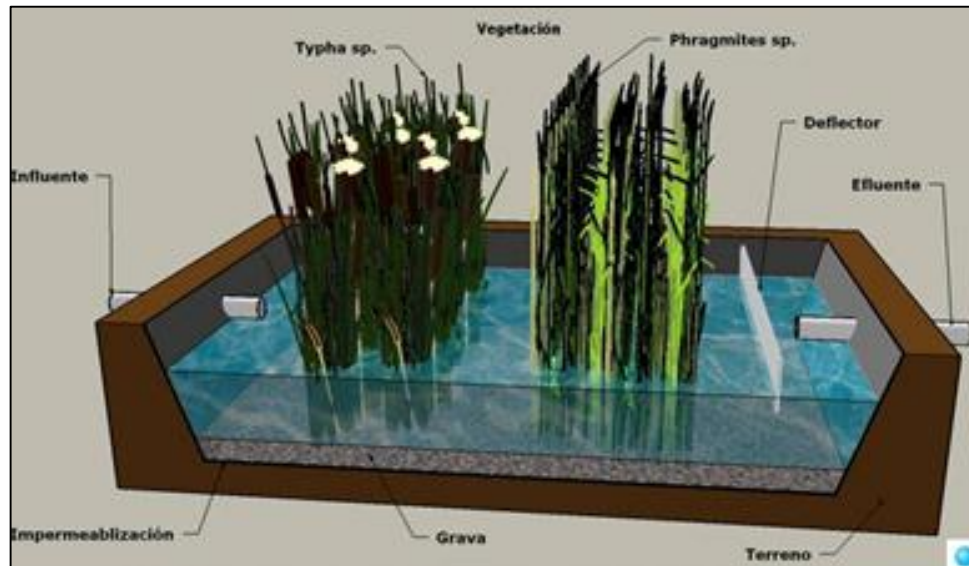
**3.3.2.1. Humedales Artificiales:** Los humedales son medios semiterrestres con un elevado grado de humedad y una profusa vegetación, que reúnen ciertas características biológicas, físicas y químicas, que les confieren un alto potencial autodepurador.

Existen dos tipos de humedales artificiales: Humedal de Flujo Superficial y Humedal de Flujo Sub-Superficial.

- Humedal de Flujo Superficial: Estos sistemas consisten típicamente de estanques o canales, con alguna clase de barrera subterránea para prevenir la filtración, suelo u otro medio conveniente a fin de soportar la vegetación emergente, y agua en una profundidad relativamente baja (0,1 a 0,6 metros), que atraviesa la unidad (Ver Figura 13). La baja profundidad del agua, la baja velocidad de flujo y la presencia de tallos de planta regulan el flujo del agua. Se aplica agua residual pre-tratada a estos sistemas y el tratamiento ocurre cuando el flujo de agua atraviesa lentamente el tallo y la raíz de la vegetación emergente (Llagas y Guadalupe, 2006). Generalmente, estos sistemas son diseñados con cargas superficiales bajas, donde

la profundidad de las aguas de estos sistemas varía entre 5 y 90 cm, sin embargo el valor más común se encuentra entre 30 y 40 cm.

**Figura 13.** Sistema de Humedal de Flujo Superficial

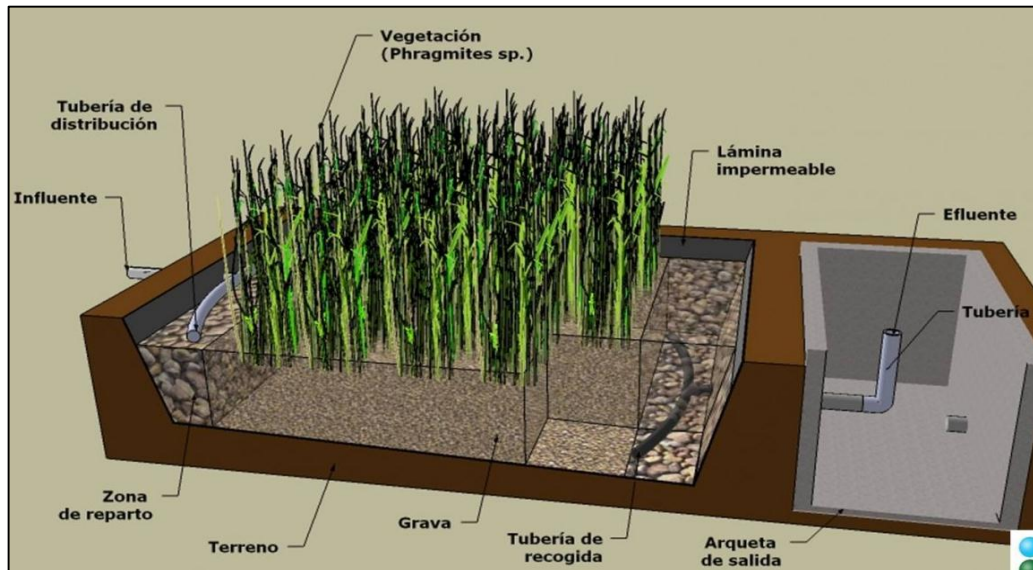


**Fuente:** LLAGAS, W., GUADALUPE E. Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMM. [En línea], [20 de septiembre de 2017]. Disponible en: ([http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol9\\_n17/a11.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol9_n17/a11.pdf)).

- Humedal de Flujo Sub-Superficial: Estos sistemas son similares a los filtros horizontales por goteo en las plantas de tratamiento convencionales. Dentro del lecho, los microbios facultativos atacan al medio y las raíces de las plantas, contactando de este modo el agua residual que fluye horizontalmente a través del lecho; mientras que el sobrante baja a la superficie del medio. La profundidad del agua se encuentra entre 0,3 y 0,9 metros. Se caracterizan por funcionar permanentemente inundados, el agua se encuentra entre 0,05 y 0,1 metros por debajo de la superficie granular<sup>12</sup> (Ver Figura 14).

<sup>12</sup> GARCÍA SERRANO, Juan. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo sub-superficial. Universidad Politécnica de Catalunya. Noviembre de 2008. p. 5.

**Figura 14.** Sistema de Humedal de Flujo Sub-Superficial



**Fuente:** Ibíd 2014., p. 48.

La vegetación de los humedales de la PTAR de Sotaquirá es Papiro (*Scirpus Papyrus*), ésta contribuye a la remoción de materia orgánica, nitrógeno y fósforo presentes en el agua residual. Adicionalmente, el medio de soporte (grava media) de las plantas y las raíces de las mismas promueven la formación de película biológica. Las plantas sembradas en el humedal fueron extraídas del humedal de la Universidad de Boyacá. Se sembraron 420 plantas para una relación de 1,0 plantas/m<sup>2</sup>.

Las estructuras anteriormente mencionadas se puede observar en las siguientes figuras.

**Figura 15.** Humedal de Flujo Superficial de la PTAR de Sotaquirá



**Figura 16.** Humedal de Flujo Sub-Superficial de la PTAR de Sotaquirá



**3.3.2.2. Lagunas de Estabilización :** Las lagunas de estabilización son lugares de almacenamiento de aguas residuales, relativamente grandes y de poca profundidad, provistas de estructuras en tierra abiertas al sol y al aire y cuyo fin es el de lograr el tratamiento de las aguas residuales a través de procesos naturales, pero controlados (Metcalf y Eddy, 1998).

En la implantación de esta tecnología se han definido como objetivos fundamentales, remover de las aguas residuales la materia orgánica que ocasiona la contaminación en la fuente receptora y eliminar los microorganismos potencialmente patógenos que representan un grave peligro para la salud. Aunque

en muchas ocasiones se presenta un tercer objetivo y es utilizar su efluente con otras finalidades, como agricultura o piscicultura (España. MOPT 1991).

La laguna de estabilización es aparentemente un método simple de tratamiento de las aguas residuales pero los mecanismos de purificación involucrados son complejos. Estos involucran procesos de sedimentación, digestión, oxidación, síntesis, fotosíntesis, respiración endógena, intercambio de gases, aireación, evaporación, corrientes térmicas y filtración (Rolim, 2000).

Existen varias formas de clasificar las lagunas. De acuerdo con el contenido de oxígeno, pueden ser: aeróbicas, anaeróbicas y facultativas. Si el oxígeno es suministrado artificialmente con aireación mecánica o aire comprimido se denominan aireadas.

Como parte del tratamiento secundario, efectuado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Sotaquirá se encuentran las **Lagunas Facultativas**, que son estanques de profundidad más reducida (1,5 a 2,5 metros), en las cuales la actividad fotosintética de las algas ejerce un papel preponderante en la capa superior, al mantener un cierto nivel de oxígeno disuelto que varía de acuerdo a la profundidad y hora del día. En zona de fondo se depositan los sólidos suspendidos que sufren un proceso de reducción por estabilización anaerobia.

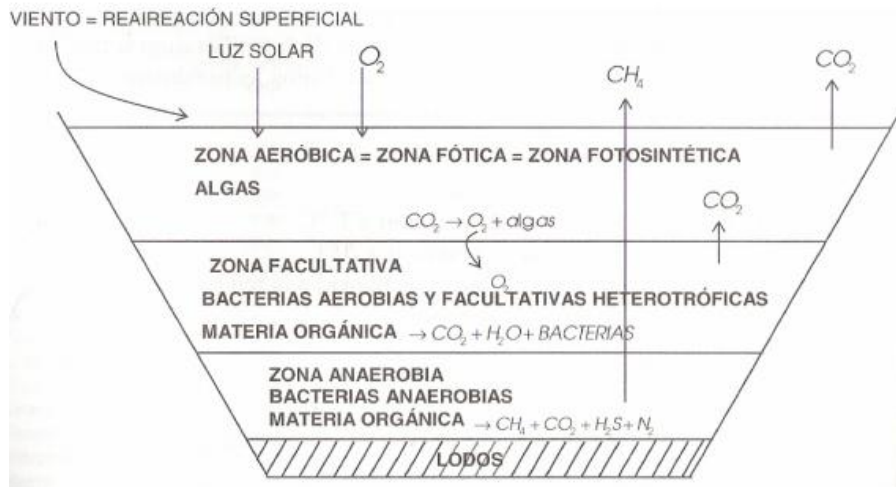
- Ecología de las lagunas facultativas: Las bacterias y las algas son los dos componentes biológicos principales de las lagunas facultativas y su interacción constituye el efecto ecológico más importante sobre el proceso de autopurificación. Estas constituyen un sistema de tratamiento bioquímico de crecimiento suspendido. El crecimiento algal representa, por una parte, el suministro adecuado de oxígeno fotosintético para la actividad aerobia bacteriana y, por otra parte, la necesidad de removerlas del efluente para impedir que aumente la concentración de sólidos suspendidos y de materia orgánica biodegradable. La población algal se representa usualmente por la concentración de clorofila "a".

Las variaciones locales en radiación solar debidas a la latitud, elevación y nubosidad, influyen sobre el diseño de una laguna de estabilización. Además la penetración de la luz solar y la disponibilidad de CO<sub>2</sub> determinan la porción de volumen de laguna con producción algal de oxígeno. En las lagunas facultativas, la porción inferior es anaerobia y la porción superior es aerobia. La porción aerobia recibe oxígeno de la actividad fotosintética algal y de la re-aireación superficial existente a través de la interfaz aire-líquido. Las variaciones de la cantidad de luz incidente producen cambios considerables en las condiciones de una laguna facultativa (Romero, 2005).

Dependiendo de la carga orgánica de una laguna, la comunidad microbial varía. En general, los microorganismos de las lagunas son los mismos de los demás sistemas de tratamiento, principalmente bacterias y protozoos; sin embargo, los seres vivos más adaptados al medio serán los microorganismos facultativos, que pueden sobrevivir en las condiciones cambiantes de oxígeno disuelto típicas de estas lagunas a lo largo del día y del año (España. MOPT, 1991).

El objetivo perseguido en las lagunas facultativas es obtener un efluente de la mayor calidad posible, en el que se haya alcanzado una elevada estabilización de la materia orgánica, y una reducción en el contenido de nutrientes y bacterias coliformes (España. MOPT, 1991).

**Figura 17.** Mecanismos de auto purificación en lagunas facultativas



**Fuente:** ROMERO, J. A. “Lagunas de Estabilización de Aguas Residuales”, Santa Fe de Bogotá, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2005, p.108-121.

Las dimensiones de la Laguna Facultativa existente en la PTAR de Sotaquirá son: Profundidad de 1,0 a 2,5 metros, altura adicional para lodos de 0,2 metros y largo y ancho de 12,6 y 25 metros respectivamente. El volumen es de 629 m<sup>3</sup>. El tiempo de retención hidráulico de la unidad de tratamiento en mención es de 9 días.

**Figura 18.** Laguna Facultativa de la PTAR de Sotaquirá



Posterior al paso del agua residual por la Laguna Facultativa, ésta ingresa a la **Laguna de Maduración**, éstos estanques tienen una altura entre 0,5 a 1 metro para que tanto el sol, como la radiación ultravioleta puedan penetrar hasta el fondo; así, la radiación ultravioleta incide en toda la profundidad de la laguna y mata los microorganismos y las bacterias. Esta remoción microbiana es mejor cuando la retención del agua es más alta, puesto que la radiación ultravioleta tiene más tiempo para afectar los gérmenes.

En relación con lo anteriormente mencionado, las lagunas de maduración son utilizadas como procesos de tratamiento diseñados con el propósito exclusivo de reducir los organismos patógenos.

Estas lagunas generalmente son el último paso del tratamiento, previo al vertimiento, disposición final o reutilización en la agricultura del efluente.

La Tabla 4 incluye datos típicos sobre parámetros de diseño para los distintos tipos de lagunas:

**Tabla 4.** Parámetros de diseño típicos para lagunas de estabilización

Parámetro	Tipo de lagunas				
	Aerobia	Facultativa	Maduración	Anaerobia	Aireada
1. Régimen de flujo	M.I	....	M.I	....	C.M
2. Tamaño de laguna (ha)	0,25 - 1,0	1,0 - 4,0(*)	1 - 4,0	0,2 - 1 (*)	1 - 4 (*)
3. Operación	serie	serie o paralelo	serie o paralelo	serie o paralelo	serie o paralelo
4. Tiempo de retención (días)	4,0 - 6,0	7,0 - 10,0	5,0 - 20	10,0 - 20,0	3,0 - 10
5. Profundidad (m)	0,30 - 0,50	1,8 - 2,5	1,0 - 1,5	2,5 - 5,0	3,0 - 5,0
6. pH	6,5 - 10,5	6,5 - 9,0	6,5 - 10,5	6,8 - 7,2	6,5 - 8,0
7. Carga de DBOs (Kg/ha.d)	80 - 160	200 - 400 +	15 - 60	400 - 1200	800 - 1500
8. Conversión de la DBOs	80 - 95	80 - 95	60 - 80	40 - 80	80 - 95
9. Sólidos susp. efluente (mg/l)	150 - 300 *	40 - 100 *	10 - 30 *	80 - 160	80 - 250 *

M.I = mezclado Intermitente

(\*) = múltiples

+ = aumentando la altura hasta 2.5 m puede ampliarse hasta 400

\* = incluye algas, microorganismos y sólidos suspendidos residuales del afluente

C.M = completamente mezclado

**Fuente:** Cuervo F., H. Fundamentos para el Análisis y Diseño de Proceso. Documento en prensa: capítulo Lagunas de estabilización. Medellín. 1987.

Las dimensiones de la Laguna de Maduración existente en la PTAR de Sotaquirá son: Profundidad de 1,5 metros y largo y ancho de 15,15 y 30,3 metros respectivamente. El volumen es de 691,2 m<sup>3</sup>. El tiempo de retención hidráulico de la unidad de tratamiento en mención es de 10 días.

**Figura 19.** Laguna de Maduración de la PTAR de Sotaquirá



### 3.3.3 Tratamiento de lodos

**3.3.3.1. Digestor de lodos:** El propósito de esta unidad es la digestión anaerobia del lodo producido en el sedimentador primario. La digestión anaerobia es un proceso biológico en el cual la materia orgánica en ausencia de oxígeno y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en biogás.

En la PTAR del Municipio de Sotaquirá, el digestor es un tanque circular construido en concreto reforzado de 1,9 m de diámetro y 2,0 m de profundidad.

**Figura 20.** Digestor de lodos de la PTAR de Sotaquirá



**3.3.3.2. Lechos de Secado** : Lecho típico de arena para secado de lodos que tiene un compartimiento rectangular poco profundo, con fondos porosos. En el caso de la PTAR del Municipio de Sotaquirá son ladrillos a junta perdida que permite la percolación de la porción húmeda de los lodos. El lodo se aplica sobre el lecho en capas de 20-30 cm y se deja secar. El desagüe se efectúa mediante drenaje de las capas inferiores y evaporación por acción del sol y el viento. Inicialmente el agua percola a través del lodo y de la arena para ser conducida por la tubería de drenaje en un periodo corto a la laguna facultativa. La pasta se agrieta a medida que se seca permitiendo la evaporación adicional.

A los lechos de secado, llega el lodo proveniente del Reactor UASB, Tanque Imhoff y el Digestor de Lodo. El área de cada lecho de secado es de 10 m<sup>2</sup>, distribuidos en dos (2) unidades de 5,5 m<sup>2</sup> con las siguientes dimensiones: Largo 2,75 m y ancho 2 m. La infraestructura de los lechos de secado de la PTAR del Municipio de Sotaquirá se puede observar a continuación.

**Figura 21.** Lechos de Secado de la PTAR de Sotaquirá



Finalmente se generan tres (3) efluentes, provenientes de la salida del Humedal de Flujo Superficial, Humedal de Flujo Sub-Superficial y Laguna de Maduración. Estos efluentes desembocan al Río Sotaquirá, el cual posteriormente desemboca al Río Chicamocha.

**Figura 22.** Efluentes de la PTAR de Sotaquirá



## **4. EVALUACIÓN TÉCNICA Y OPERATIVA A LAS UNIDADES EXISTENTES EN LA PTAR DEL MUNICIPIO DE SOTAQUIRA**

### **4.1. Diagnóstico del Sistema de Tratamiento**

Por medio de una serie de visitas técnicas de inspección, indagación al personal encargado y revisión de documentación entregada por la Alcaldía y la Empresa de Servicios Públicos del Municipio, se procedió a realizar un diagnóstico al sistema con el fin de conocer las condiciones actuales de operación y mantenimiento de cada unidad de tratamiento e identificar posibles falencias y/o aspectos por mejorar.

**4.1.1. Componentes Técnicos de la PTAR:** La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Sotaquirá, al tener un diseño que opera por gravedad, beneficia su operación, aprovechando el descenso de las aguas residuales, evitando así el consumo de energía para los procesos.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Sotaquirá cuenta con un (1) operario, que realiza las labores de mantenimiento diarias en la jornada de la mañana (realiza rondas de inspección, medición in-situ de algunos parámetros, retiro de material flotante en algunas unidades de tratamiento, disposición de lodos, entre otras actividades). La PTAR cuenta con una edificación o un cuarto en donde se tienen algunos equipos de medición in-situ de parámetros y se mantienen herramientas de extracción de material, sin embargo no fue posible el acceso a dicha estructura.

Adicionalmente, durante las visitas efectuadas a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Sotaquirá se evidenciaron algunos aspectos a mejorar durante las diferentes unidades de tratamientos, los cuales se describen a continuación:

- Canal de Cribado: en cuanto al material y espaciamiento de las rejillas, éstos se encuentran en buenas condiciones; no obstante, se evidenció material y residuos retenidos en las rejillas sin ser removido previamente, a su vez se observó material retirado pero no dispuesto adecuadamente, ya que se encontraba sobre las bandejas metálicas que protegen las rejillas de cribado (Ver Figura 23).

**Figura 23.** Material Flotante – Canal de Cribado PTAR Sotaquirá



- Desarenador: con relación a los parámetros de diseño, se puede afirmar que son acordes a los establecidos en el Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2000, cabe resaltar que a velocidades menores a 0,3 m/s, podrían generar problemas asociados con la sedimentación de la materia orgánica (olores, presencia de insectos, etc.); mientras que velocidades mayores no permitirían la sedimentación de las arenas<sup>13</sup>. En base con lo observado en campo, se evidenció la presencia de material flotante sin retirar en el canal de desarenado y posiblemente colmatación de arenas y material fino en el fondo del canal, lo anterior se infiere debido a la turbiedad del agua en este punto del tratamiento (Ver Figura 24).

---

<sup>13</sup> BRAVO MENDOZA, Willis Frened. Estructuras Complementarias de un Sistema de Lagunas de Estabilización para el Tratamiento de Aguas Residuales. Sincelejo, Sucre, 2007, 97 p. Trabajo de grado. (Ingeniero Civil). Universidad de Sucre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil. Disponible en línea: (<http://biblioteca.unisucre.edu.co:8080/dspace/bitstream/123456789/372/1/T628.352%20B826.pdf>)

**Figura 24.** Material Flotante – Canal de Desarenador PTAR Sotaquirá



- Sedimentador Primario y Tanque Imhoff: al igual que en las unidades de pre-tratamiento, se evidenció la presencia de material flotante sobre la estructura del rebosadero (Sedimentador Primario) y Superficie del agua (Tanque Imhoff). Ésta acumulación de material, es indicador de altas concentraciones de grasas y aceites en el afluente de la planta; en este orden de ideas, esta capa sobrenadante es indeseable porque reduce el volumen efectivo de las unidades de operación, por tanto afecta la eficiencia del proceso, adicionalmente el material flotante presente en estas unidades, da como resultado, zonas de actividad anaerobia que, pueden traducirse a su vez en problemas en la sedimentación y malos olores.

**Figura 25.** Material Flotante – Sedimentador Primario PTAR Sotaquirá



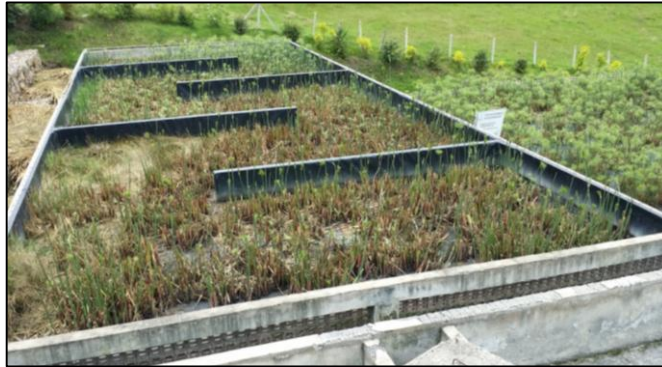
**Figura 26.** Nata Flotante – Tanque Imhoff PTAR Sotaquirá



- Reactor UASB y Tanque Imhoff: debido a que en estos procesos de descomposición de materia orgánica, las bacterias no utilizan oxígeno, se originan una serie de reacciones químicas, que dan resultado a la producción de gases como el metano ( $\text{CH}_4$ ), Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) y compuestos sulfurosos que producen malos olores, por lo cual el control de éstos gases es un proceso que implica mucha atención, bien sea por explosiones o malos olores. Si bien, el metano es un gas de efecto invernadero y se puede aprovechar para producir energía, las condiciones de generación de este gas en la PTAR son bajas, por lo que es inviable su aprovechamiento y es liberado al medio ambiente. No obstante ésta liberación al medio ambiente puede traer problemas de corrosión en las tuberías de salida de gases, problemas a largo plazo por inhalación de la persona que allí labora y escenarios de contaminación atmosférica.

-Humedales Artificiales: se evidenció de forma más relevante en algunas zonas del Humedal de Flujo Superficial, la desaparición de la cubierta vegetal y de la vegetación del humedal, lo anterior se pudo haber presentado por diversos factores, de los cuales se destaca el clima (radicación solar y vientos), el nivel de agua existente, la aparición de especies invasoras y las características del afluente a este tipo de sistemas de tratamiento.

**Figura 27.** Densidad Capa Vegetativa – Humedal de Flujo Superficial PTAR Sotaquirá



- Laguna Facultativa y Laguna de Maduración: se evidenció de igual manera la presencia de natas y material flotante, lo cual es producto de la falta de mantenimiento en las unidades de tratamiento previas y a su vez, de la afloración excesiva de algas (formación de nata verde), afloración de lodo de fondo de las lagunas y poca circulación de la masa de agua.

**Figura 28.** Material Sobrenadante en las Lagunas de Estabilización PTAR Sotaquirá



- Digestor de Lodos y Lechos de Secado: estas unidades de tratamiento se encuentran en buen estado, libres de fisuras o perforaciones que puedan afectar su operación normal. Los lodos obtenidos de las unidades de los lechos de secado

y previamente estabilizados, son empleados como fuente de abono, acondicionadores y restauradores de suelos.

Sin embargo, este aprovechamiento de lodo requiere de un análisis previo para determinar que los parámetros cumplen con lo establecido en el Decreto 1287 de 2014, por el cual se establecen los criterios para el uso de los biosólidos generados en pantas de tratamiento de aguas residuales municipales.

- Personal Operativo: En la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del municipio labora un (1) operario capacitado para dicha labor, el cual realiza las actividades de limpieza y mantenimiento en la jornada diurna y se encuentra disponible a lo largo del día para atender cualquier eventualidad que se presente.

- Manual de Operación y Mantenimiento de la PTAR: Según la información suministrada por el operario de la planta, se evidencia que no se tiene implementado un manual de operaciones de la PTAR, el cual debe contener la descripción de cada una de las estructuras que intervienen en el tratamiento, en qué tiempo y frecuencia se debe realizar el mantenimiento de las mismas, entre otros.

- Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos – PSMV: Según la Empresa de Servicios Públicos – Emsotaquirá S.A E.S.P., el documento se encuentra en formulación; sin embargo, ejecutar este plan de saneamiento es de estricto cumplimiento, según la Resolución 1433 de 2004 y deberá contener las actividades e inversiones necesarias para avanzar en el saneamiento y tratamiento de los vertimientos; adicionalmente, el plan deberá formularse teniendo en cuenta tanto la información disponible sobre calidad y uso de la corriente, tramos o cuerpos de agua receptores, como también lo definido en el Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000 y el Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio.

- Control de calidad del proceso: De acuerdo con las visitas a la planta y la comunicación con el operario, se observa que no se manejan reportes diarios de inspección a la planta, identificando deficiencias, las cuales deben eliminarse de acuerdo a la prioridad y cumplimiento de las respectivas instrucciones de manejo, los acontecimientos especiales deben comunicarse a la jefatura y registrarse en el reporte diario.

#### **4.1.2. Componentes operativos PTAR**

- Control de la calidad del agua: Para el control de la calidad del agua, el operario afirma que se realizan muestreos de control interno, en donde se caracterizan el afluente y los vertimientos pero con los parámetros in-situ y fisicoquímicos básicos; sin embargo, no fue posible tener acceso a dichos documentos. Es importante realizar mediciones periódicas en los procesos del tratamiento, para identificar falencias en el sistema y proponer acciones oportunas que permitan alcanzar el mayor grado de eficiencia posible.

- Programas de Higiene y Seguridad Industrial: Actualmente la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Sotaquirá, no posee un programa de higiene y seguridad industrial estructurado e implementado; de igual manera, el operario no cuenta con la dotación necesaria (solamente utiliza botas de seguridad), tampoco exige a los visitantes documentos necesarios para el ingreso a la PTAR. Adicionalmente, es pertinente mencionar que no se observó avisos de señalización ni equipos de socorro y protección laboral como botiquines, extintores, camillas, entre otros.

- Vulnerabilidad de la PTAR: Durante el desarrollo investigativo y elaboración del presente documento, no se encontró información específica relacionada con los planes de emergencia, contingencia y el mapa de riesgo de la PTAR. Lo anterior debido a que ninguna administración municipal se ha dado a la tarea de realizarlos

y por ende la empresa de servicios públicos no cuenta con el respaldo para la preparación de los documentos en mención.

- Seguimiento y Control: La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Sotaquirá es vigilada y controlada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial – MAVDT, Corporación Autónoma de Boyacá- Corpoboyacá, la Superintendencia de Servicios Públicos, entre actores involucrados.

## **5. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA PTAR DEL MUNICIPIO DE SOTAQUIRÁ**

Para la determinación de la eficiencia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Sotaquirá, se procedió a realizar una caracterización tanto a la entrada como a las salidas del sistema de tratamiento (Salida Humedal de Flujo Sub-Superficial y Salida Laguna de Maduración), en cuanto a la Salida proveniente del Humedal de Flujo Superficial, es importante mencionar que no fue posible efectuar el muestreo debido a que se estaban realizando labores de mantenimiento en la vegetación. Dentro de la caracterización, se incluyeron los siguientes parámetros:

- Caudal
- pH
- Temperatura
- Demanda Biológica de Oxígeno - DBO<sub>5</sub>
- Demanda Química de Oxígeno - DQO
- Sólidos Suspendidos Totales – SST
- Aceites y Grasas
- Coliformes Totales

La toma de muestras se realizó según el instructivo de toma de muestras de agua residual emitido por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, de igual manera se siguieron las indicaciones de preservación y muestreo del laboratorio Analizar Laboratorio Físicoquímico Ltda, laboratorio acreditado ante el IDEAM, con el cual se contrató el servicio de análisis de las muestras.

El monitoreo fue de tipo compuesto y se efectuó el día 26 de Septiembre de 2017 en la jornada de la mañana, durante un periodo de 4 horas, tomando alícuotas y midiendo parámetros in-situ cada 30 minutos. La medición de caudal se realizó por medio del método volumétrico, empleando como equipamiento un recipiente de volumen conocido (balde) y un cronómetro. Respecto a la medición de pH y Temperatura, se empleó un Tester de la marca Hanna Instruments, facilitado por el operador de la PTAR y previamente calibrado con las soluciones de calibración a pH 4.01, 7.01 y 10.01 Unidades. A continuación, en las siguientes tablas se muestran las mediciones de parámetros in-situ registradas y los volúmenes de las alícuotas tomadas para la composición de las muestras.

El valor del volumen de composición por alícuota se realizó por medio de la Ecuación 1.

#### **Ecuación 1. Volumen de Composición**

$$V_i = (Q_i * V_{tc}) / (n * Q_{prom})$$

Dónde:

$V_i$  es el volumen de cada alícuota

$V_{tc}$  es el volumen total a componer (5 Litros)

$Q_i$  el caudal instantáneo de cada muestra puntual

$Q_{prom}$  es el caudal promedio durante el periodo de muestreo

$n$  es el número de muestras puntuales tomadas

La composición se efectuó mezclando un volumen de las alícuotas en forma proporcional al caudal.

**Tabla 5.** Medición de Parámetros In-Situ. Entrada PTAR

Entrada Sistema de Tratamiento							
Hora	Volumen (L)	Tiempo (s)	Caudal (L/s)	pH (Unidades)	Temperatura (°C)	Alícuotas	
						Fracción	Volumen teórico (L)
9:30	6,00	4,00	1,50	7,8	12,0	0,14	0,69
10:00	5,00	4,00	1,25	7,5	12,3	0,11	0,57
10:30	4,50	4,00	1,13	7,3	12,5	0,10	0,52
11:00	5,00	3,00	1,67	7,5	12,8	0,15	0,77
11:30	4,00	2,00	2,00	7,4	12,8	0,18	0,92
12:00	5,00	3,00	1,67	7,2	13,0	0,15	0,77
12:30	5,00	3,00	1,67	7,2	13,2	0,15	0,77
						100,00%	5,00
<b>Promedio</b>			1,55	7,41	12,7	<b>Tamaño de muestra</b>	
<b>Máximo</b>			2,00	7,80	13,2		
<b>Mínimo</b>			1,13	7,20	12,0		

**Tabla 6.** Medición de Parámetros In-Situ. Salida Humedal de Flujo Sub-Superficial

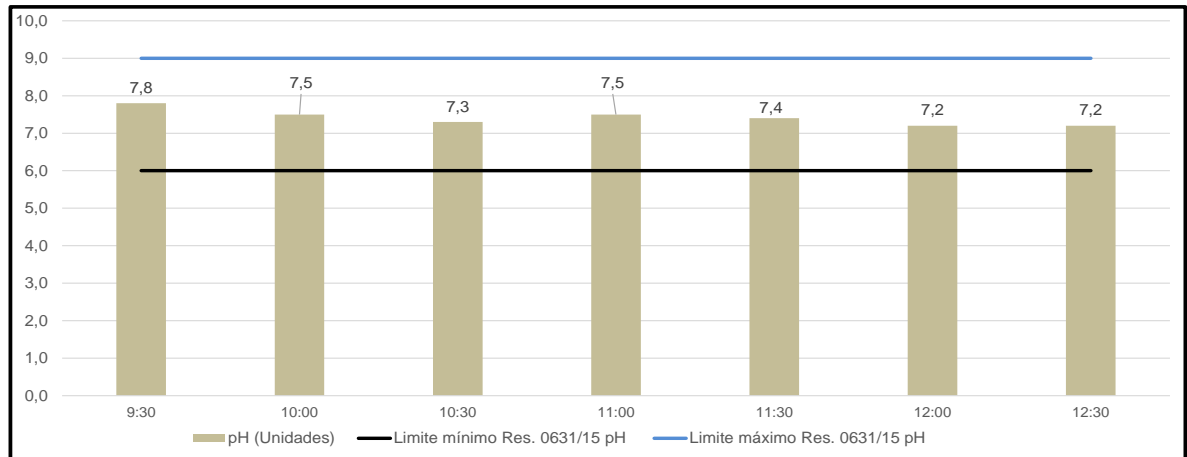
Salida Humedal de Flujo Sub-Superficial							
Hora	Volumen (L)	Tiempo (s)	Caudal (L/s)	pH (Unidades)	Temperatura (°C)	Alícuotas	
						Fracción	Volumen teórico (L)
9:45	5,00	11,00	0,45	7,6	12,2	0,11	0,56
10:15	4,00	10,00	0,40	7,5	12,5	0,10	0,49
10:45	4,00	9,00	0,44	7,4	12,9	0,11	0,55
11:15	5,00	8,00	0,63	7,4	13,0	0,15	0,77
11:45	4,00	7,00	0,57	7,3	13,2	0,14	0,71
12:15	5,00	7,00	0,71	7,4	13,3	0,18	0,88
12:45	5,00	6,00	0,83	7,2	13,5	0,21	1,03
						100%	5,00
<b>Promedio</b>			0,58	7,40	12,9	<b>Tamaño de muestra</b>	
<b>Máximo</b>			0,83	7,60	13,5		
<b>Mínimo</b>			0,40	7,20	12,2		

**Tabla 7.** Medición de Parámetros In-Situ. Salida Laguna de Maduración

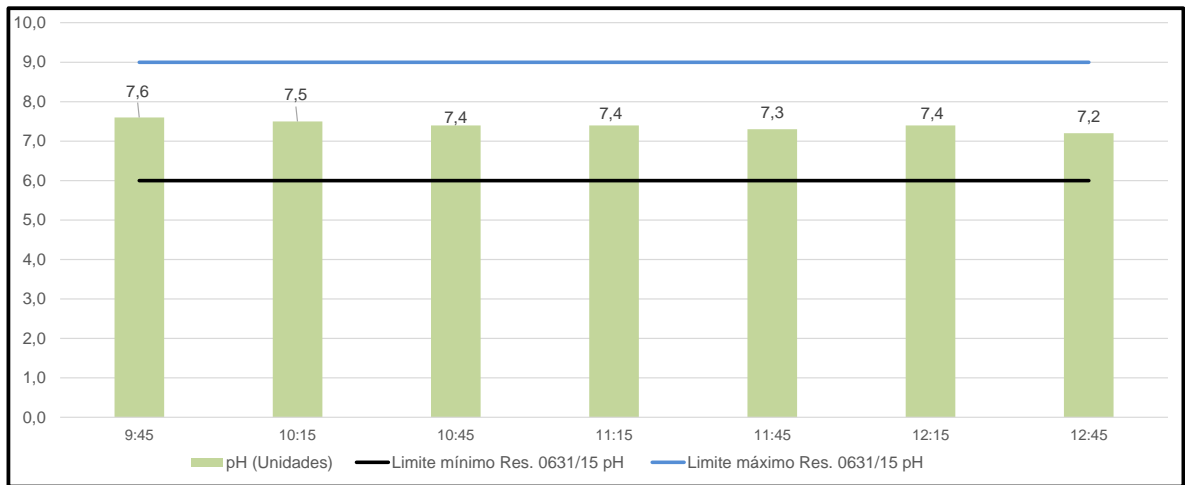
Salida Laguna de Maduración							
Hora	Volumen (L)	Tiempo (s)	Caudal (L/s)	pH (Unidades)	Temperatura (°C)	Alícuotas	
						Fracción	Volumen teórico (L)
10:00	5,00	13,00	0,38	7,8	13,4	0,14	0,69
10:30	5,00	12,00	0,42	7,7	13,5	0,15	0,74
11:00	5,00	13,00	0,38	7,7	13,7	0,14	0,69
11:30	5,00	11,00	0,45	7,6	13,9	0,16	0,81
12:00	5,00	12,00	0,42	7,7	14,1	0,15	0,74
12:30	5,00	13,00	0,38	7,8	14,2	0,14	0,69
13:00	5,00	14,00	0,36	7,7	14,3	0,13	0,64
						100%	5,00
<b>Promedio</b>			0,40	7,71	13,9	<b>Tamaño de muestra</b>	
<b>Máximo</b>			0,45	7,80	14,3		
<b>Mínimo</b>			0,36	7,60	13,4		

En las siguientes gráficas, se presentan los resultados de los parámetros In-Situ, exponiendo el estado de cumplimiento frente a la Resolución 0631 de 2016 (Artículo 8), según corresponda.

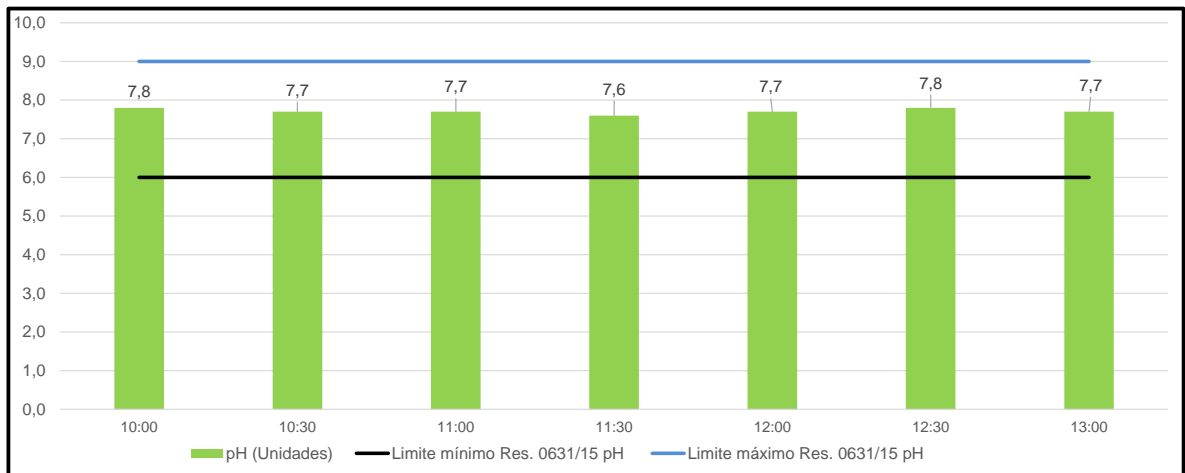
**Gráfica 1.** Valores medidos de pH – Entrada PTAR



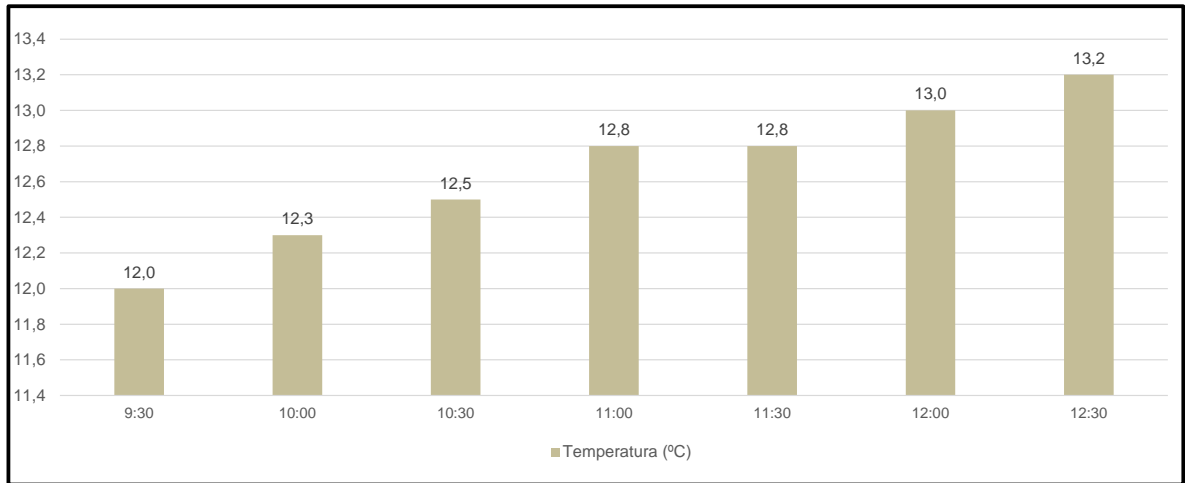
**Gráfica 2.** Valores medidos de pH – Salida Humedal de Flujo Sub-Superficial



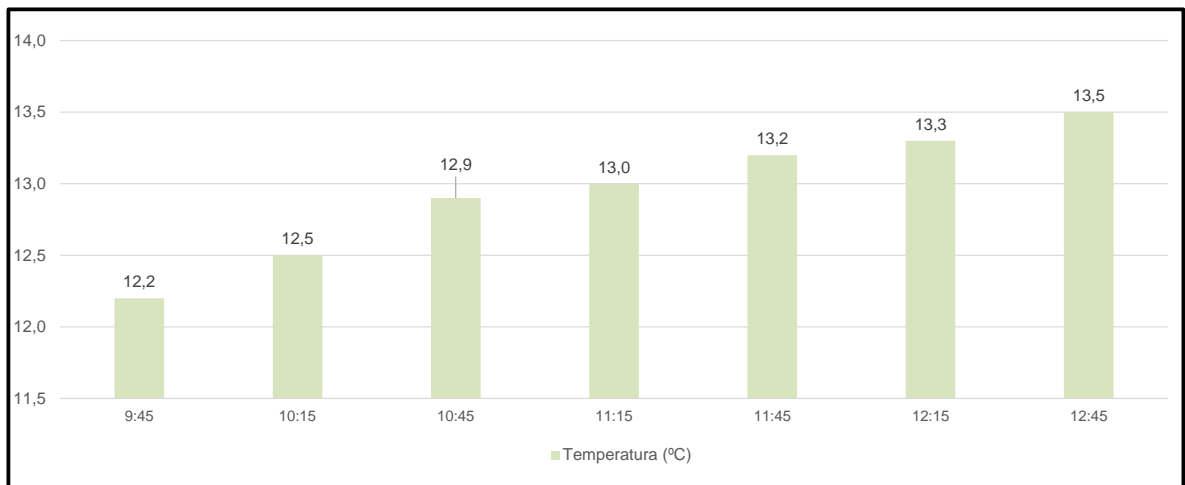
**Gráfica 3.** Valores medidos de pH – Salida Laguna de Maduración



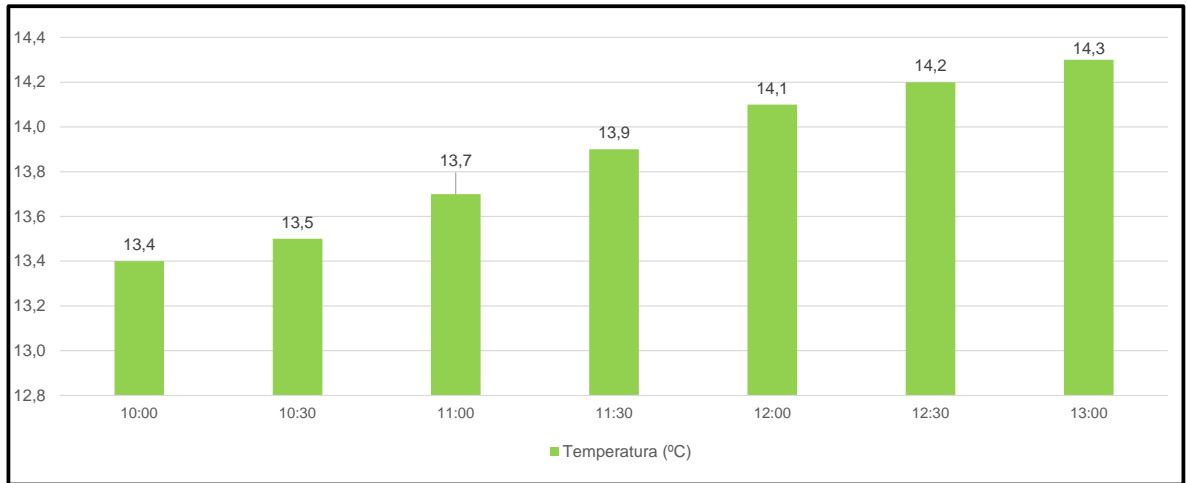
**Gráfica 4.** Valores medidos de Temperatura – Entrada PTAR



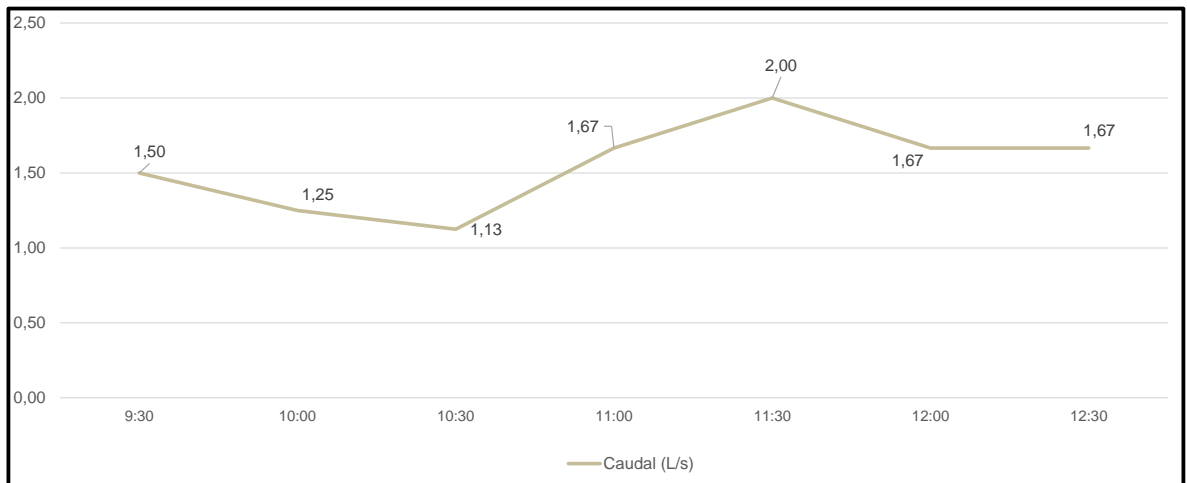
**Gráfica 5.** Valores medidos de Temperatura – Salida Humedal de Flujo Sub-Superficial



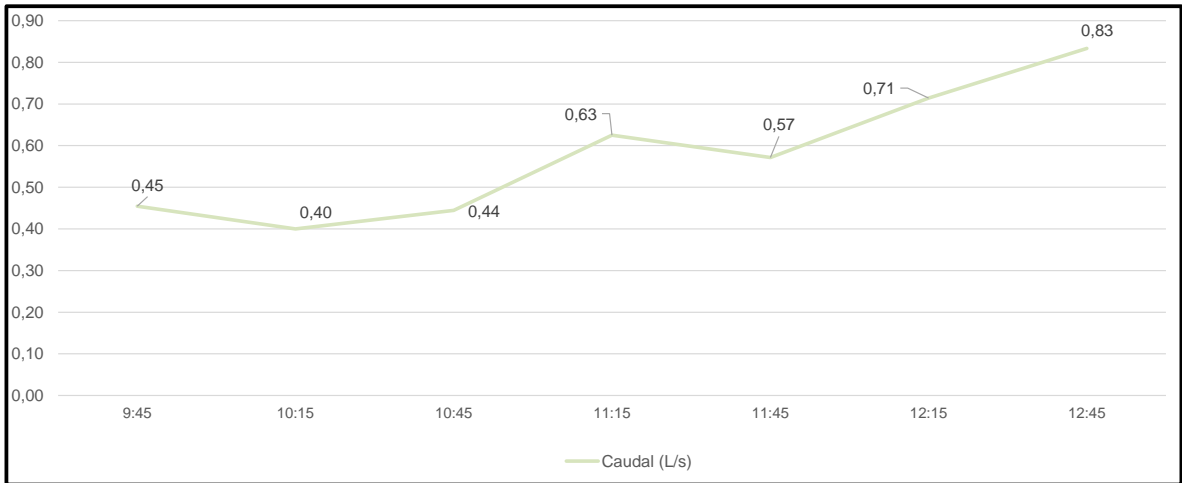
**Gráfica 6.** Valores medidos de Temperatura – Salida Laguna de Maduración



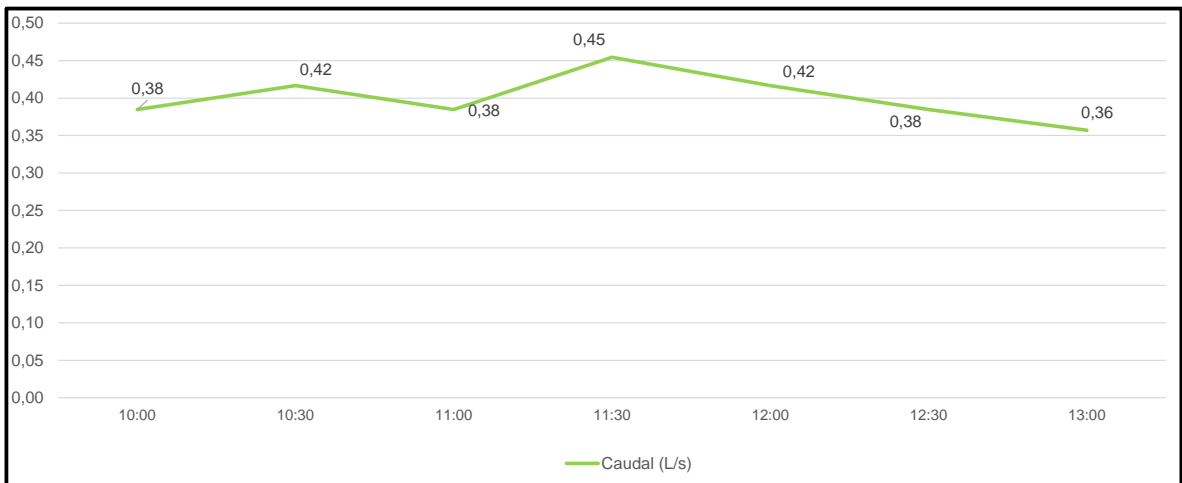
**Gráfica 7.** Valores medidos de Caudal – Entrada PTAR



**Gráfica 8.** Valores medidos de Caudal – Salida Humedal de Flujo Sub-Superficial



**Gráfica 9.** Valores medidos de Temperatura – Salida Laguna de Maduración



El Potencial de Hidrogeniones – pH, medido en los puntos de muestreo identificados como Entrada PTAR, Salida Humedal de Flujo Sub-Superficial y Salida Laguna de Maduración, registró valores promedio del orden de 7,41 Unidades, 7,40 Unidades y 7,71 Unidades respectivamente, por lo cual se evidencia una tendencia alcalina, debido a la presencia de bicarbonatos en el agua. De acuerdo con lo anterior, se observó que en la Salida de la Laguna de Maduración, se reportaron valores más altos de pH con respecto a los demás puntos de

monitoreo, lo cual posiblemente se encuentra relacionado con la actividad fotosintética de las algas presentes en la laguna, debido al consumo de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>). En cuanto al cumplimiento normativo, se observó que los valores promedio obtenidos, se encuentran dentro de los límites máximo y mínimo establecidos en la Resolución 0631 de 2015, Artículo 8.

Respecto al parámetro Temperatura, se obtuvieron valores con mínimas variaciones y acordes a las condiciones climáticas de la zona. En cuanto al Caudal medido, se observaron valores acordes a las condiciones del sistema, los cuales se encuentran relacionados con las actividades diarias de las personas que habitan en el municipio.

Los parámetros medidos en el laboratorio se encuentran en el Anexo 3 del presente documento y se relacionan en la Tabla a continuación, con su respectiva comparación frente a lo exigido en la normatividad aplicable.

**Tabla 8.** Resultados de Parámetros medidos en laboratorio y comparación con la norma

Parámetro	Unidades	Entrada PTAR	Salida Humedal de Flujo Sub-Superficial	Salida Laguna de Maduración	Valor Máximo exigido Resolución 0631/15 – Art. 8
DBO <sub>5</sub>	mg/L O <sub>2</sub>	3903	694	378	90
DQO	mg/L O <sub>2</sub>	6085	1074	694	180
Aceites y Grasas	mg/L	145	24	11	20
SST	mg/L O <sub>2</sub>	258	170	168	90
Coliformes Totales	NMP/100 mL	47x10 <sup>7</sup>	14x10 <sup>3</sup>	78x10 <sup>2</sup>	N.E

**Fuente:** Analizar Laboratorio Físicoquímico Ltda

Con respecto a las concentraciones de los parámetros medidos en laboratorio, se observó que frente a lo exigido por la normatividad, los parámetros DBO<sub>5</sub>, DQO y SST reportados en la Salida del Humedal de Flujo Sub-Superficial y Salida de la Laguna de Maduración, sobrepasan los límites máximos establecidos en la Resolución 0631 de 2015; en cuanto al parámetro Aceites y Grasas, el valor arrojado en la Salida de la Laguna de Maduración cumple satisfactoriamente lo exigido legalmente.

Si bien para el parámetro Coliformes Totales, no se tiene establecido un límite normativo, se observó que a lo largo de las líneas de tratamiento, se logra una reducción significativa de la población bacteriana de tipo coliforme, entre la cual se encuentran algunos microorganismos patógenos.

Es importante resaltar que la Resolución 0631 de 2015 no contempla porcentajes de remoción en carga sino valores límites máximos permisibles; sin embargo, como control interno operacional, se puede determinar la eficiencia de remoción en carga de la PTAR para los parámetros DBO<sub>5</sub>, Aceites y Grasas y SST, por medio de la siguiente ecuación:

### **Ecuación 2. Eficiencia de Remoción**

$$\text{Remoción (\%)} = \frac{\text{Concentración Afluente} - \text{Concentración Efluente}}{\text{Concentración Afluente}}$$

**Tabla 9. Porcentajes de Eficiencia de Remoción**

Parámetro	Entrada PTAR	Salida Humedal de Flujo Sub-Superficial	Eficiencia de Remoción (%)	Salida Laguna de Maduración	Eficiencia de Remoción (%)
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	3903	694	82%	378	90%
Aceites y Grasas (mg/L)	145	24	83%	11	92%
SST (mg/L)	258	170	34%	168	34%

Con base en los porcentajes de remoción calculados para los dos trenes de tratamiento, es posible mencionar que en términos de remoción de  $\text{DBO}_5$  y Aceites y Grasas, la PTAR opera eficientemente; sin embargo, en cuanto a los SST, la eficiencia tanto en el sistema de humedales como en el sistema de lagunas, arrojó un porcentaje de remoción de 34%; por lo anterior y en términos de material sólido suspendido, los resultados guardan coherencia con lo diagnosticado, razón por la cual se recomienda tomar acciones en cuanto a operación y mantenimiento del sistema con el fin de mejorar la remoción de sólidos suspendidos.

## **6. CONSIDERACIONES TÉCNICAS Y OPERATIVAS PARA EL MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES**

Luego de haber efectuado una serie de visitas de reconocimiento, diagnóstico y toma de muestras en el afluente y efluentes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Municipio de Sotaquirá, fue posible observar la falta de mantenimiento y seguimiento continuo en algunas de las unidades que conforman el sistema de tratamiento, a partir de la evaluación y el diagnóstico realizado, a continuación se plantean las siguientes consideraciones técnicas y operativas para el mejoramiento del sistema de tratamiento de las aguas residuales del municipio.

- Se debe tener un manual de operación y mantenimiento, que contemple como mínimo, siguientes aspectos:
  - Plan de Limpieza y mantenimiento
  - Formulario de registros, datos operacionales y mediciones de rutina
  - Programa de Control de Olores
  - Programa de recolección y disposición final de residuos sólidos
  - Operación en condiciones de caudal máximo y mínimo
  - Manejo de lodos

- Arranque
  - Prevención de Lodos Flotantes
  - Programas de mantenimiento correctivo
  - Control de recirculación
  - Programa de capacitación periódica al operario
  - Programas de prevención de accidentes, protección laboral e higiene
- Haciendo énfasis en el problema de formación de material flotante en las unidades de tratamiento de Cribado, Desarenado, Sedimentación Primaria y Sistema de Lagunas de Estabilización se considera realizar actividades de seguimiento de variables en cada unidad respecto a los siguientes parámetros: caudal, tiempos de retención, revisión de parámetros de diseño, medición de parámetros de control y actividades de mantenimiento prioritarias, dentro de las cuales se propone realizar lo siguiente:

**Tabla 10.** Actividades de Mantenimiento y Operación consideradas como prioritarias

Unidad de Tratamiento	Actividad de operación y mantenimiento
<b>Canal de Cribado</b>	Los residuos deben ser recogidos como mínimo una vez al día, para ello el operador deberá utilizar un rastrillo, con dientes de igual separación que las rejillas y el material retenido deberá ser colocado en la superficie de escurrimiento, una vez el material haya perdido gran cantidad de agua, podrá disponerse de forma adecuada o en su defecto ser transportado en un contenedor de residuos.
<b>Canal de Desarenado</b>	Medición periódica del lecho de arena acumulado (aislamiento del desarenador cuando la arena ocupe 2/3 del volumen). Remoción de sedimentos periódicamente, dependiendo de la calidad del afluente. Éste material removido deberá ser dispuesto de la misma forma que el extraído del canal de las rejillas.
<b>Sedimentador Primario</b>	Remover los sólidos acumulados en la entrada y salida del agua, en mamparas y vertederos. Así como cepillar las canaletas de recolección de agua. De igual manera, se debe determinar el nivel de lodos de fondo y su concentración.
<b>Laguna Facultativa y Laguna de Maduración</b>	El material flotante presente en estas unidades, ya sea por afloración del lodo de fondo, paso de material flotante de unidades de tratamiento previas y proliferación

Unidad de Tratamiento	Actividad de operación y mantenimiento
	excesiva de algas, deberán ser removidos de la superficie de las lagunas por medio de rastrillo fino de mango largo. Éste material removido deberá ser dispuesto de la misma forma que el extraído del canal de las rejas.
<b>Humedales Artificiales</b>	La operación y el mantenimiento de los humedales artificiales se basa en la limpieza de las estructuras de entrada y descarga, manejo de la vegetación (revisión de existencia de especies invasoras, plagas, presencia de herbicidas en el agua, entre otros). No son necesarias podas periódicas de la vegetación, ya que la parte aérea de las plantas no contribuye a la remoción de contaminantes. Por otra parte, es necesario verificar que el agua está cubriendo todas las partes de la superficie del humedal y que el aumento de residuos no ha bloqueado los caminos del flujo

Para las anteriores actividades, que se consideraron como prioritarias dadas las condiciones actuales de la PTAR, es importante su ejecución rutinaria, en donde algunas se tendrán que realizar más de una vez al día, algunas una sola vez y otras posiblemente una o dos veces a la semana, esto dependerá de cómo se establezca el control de la PTAR por parte del operador. De igual manera se recomienda realizar limpieza y mantenimiento a las tuberías de distribución a lo largo del sistema de tratamiento.

**6.1. Recomendaciones de proceso:** A partir de la evaluación técnica y operativa de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Sotaquirá, se generaron una serie de consideraciones para el mejoramiento en sus procesos y por ende en su funcionamiento, lo anterior dio lugar aparte de plantear consideraciones, de generar recomendaciones en los procesos de tratamiento, para de esta manera, proponer alternativas y estrategias de mejora y optimización a corto, mediano y largo plazo.

Las recomendaciones de proceso a tener en cuenta son:

- Seguimiento y control a las unidades de tratamiento anaerobio empleadas en la PTAR: se debe disponer de herramientas que permitan el control de las unidades

de tratamiento anaerobio existentes en la PTAR (Reactor UASB, Tanque Imhoff y Laguna Facultativa a nivel de fondo). ya que los procesos de tratamiento biológico anaerobio, son susceptibles a cambios bruscos de temperatura, pH, características del sustrato (agua residual a tratar), tiempo de retención hidráulico, entre otros. Adicional a lo anterior, se recomienda realizar purga y caracterización de lodos.

- Seguimiento y control a lagunas: es importante mantener un control estricto a los sistemas de tratamiento con lagunaje, el operador debe mantener un registro periódico de las características visuales y cualitativas de cada una de las lagunas (color, lodos flotantes, natas vegetales, olor, daños en los diques, presencia de vegetación en los diques, presencia de espumas, presencia de insectos, presencia de peces y presencia de aves); de igual forma, se deben tener en cuenta las condiciones climáticas en el momento del registro y medición de parámetros in-situ básicos como temperatura del agua de la laguna, temperatura del aire, oxígeno disuelto y pH. Los parámetros in-situ mencionados anteriormente son importantes para el desarrollo de los procesos biológicos al interior de las lagunas; asimismo se debe remover la capa de lodo de fondo en la laguna facultativa, cuando éste haya alcanzado una altura de 1,0 metro.

Además, es pertinente mencionar que la presencia de material flotante y capa algal en la superficie de las lagunas, afecta la penetración de luz solar al interior de la laguna e impide la actividad fotosintética.

- Monitoreos de calidad de agua: se recomienda realizar controles y monitoreos periódicos en el afluente y efluente de la PTAR, lo anterior conforme a los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, exigidos por la normatividad ambiental vigente en materia de vertimientos domésticos (Resolución 0631 de 2015 – Artículo 8). De igual manera, se recomienda realizar controles internos en cada una de las unidades de tratamiento, con el fin de determinar su eficiencia en cuanto a remoción en carga, lo cual permite evidenciar su buen funcionamiento.

## **7. IDENTIFICACIÓN DE MARCO NORMATIVO PARA REÚSO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS**

El reúso de aguas residuales tratadas, está definido como su aprovechamiento en actividades diferentes a las cuales fueron originadas. Los tipos y aplicaciones se clasifican de acuerdo con el sector o infraestructura que recibe el beneficio, siendo los principales: el urbano, que incluye irrigación de parques públicos, campos de atletismo, áreas residenciales y campos de golf; el industrial especialmente en sistemas de refrigeración; y el agrícola, en la irrigación de cultivos. Éste último es el principal uso (Gutiérrez 2003).

La actividad agrícola demanda agua residual por la necesidad de un abastecimiento regular que compense la escasez del recurso en épocas de verano, éste sector productivo demanda más agua que otros sectores como el doméstico e industrial; adicionalmente, el uso de aguas residuales tratadas presenta beneficios asociados al mejoramiento de la fertilidad de los suelos agrícolas por el aporte de materia orgánica, macronutrientes (principalmente Nitrógeno y Fósforo) y oligoelementos como Sodio y Potasio, permitiendo reducir y en algunos casos eliminar, la necesidad del uso de fertilizantes. Sin embargo, deben considerarse aspectos de calidad con el fin de evitar riesgos a la salud pública, principalmente en lo que se refiere a sus características microbiológicas. Ésta es considerada, la principal razón para el establecimiento de guías y regulaciones para el reúso seguro de estas aguas en diferentes aplicaciones.

En base con lo anteriormente mencionado, el Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT, adoptó las disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas mediante la Resolución 1207 de 2014, considerando que el uso eficiente del agua es fundamental para la conservación del recurso hídrico, y es básico para el desarrollo sostenible, lo anterior guarda relación con la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico,

expedida en el año 2010, la cual se orienta a fortalecer la implementación de procesos y tecnologías de ahorro y uso eficiente del agua.

La Resolución 1207 de 2014, establece en su Artículo 3, que el aprovechamiento de estas aguas requiere de concesión y que las condiciones del reuso son las siguientes:

- Cuando el Usuario Receptor es el mismo Usuario Generador, se requerirá efectuar la modificación de la Concesión de Aguas, de la Licencia Ambiental o del Plan de Manejo Ambiental cuando estos instrumentos incluyan la Concesión de Aguas.
- Cuando el Usuario Receptor es diferente al Usuario Generador, el primero deberá obtener la Concesión de Aguas, o la modificación de la Licencia Ambiental o del Plan de Manejo Ambiental cuando estos instrumentos incluyan la Concesión de Aguas.
- Cuando el Usuario Receptor es diferente al Usuario Generador, este último deberá presentar para el trámite de modificación de la Concesión de Aguas, Permiso de Vertimiento, Licencia Ambiental o Plan de Manejo Ambiental, según sea el caso, copia del acto administrativo mediante el cual la Autoridad Ambiental competente otorgó la concesión para el uso de las aguas residuales tratadas al Usuario Receptor, sin perjuicio de los demás requisitos que establece la presente resolución.
- El suministro de las cantidades (volumen o caudal) de agua requeridas para satisfacer la Concesión para el uso de las aguas residuales tratadas está sujeto a la disponibilidad definida por parte del Usuario Generador.
- En la Concesión de Aguas para el uso de aguas residuales tratadas se definirá el área o sitio en el cual se realizará la actividad.

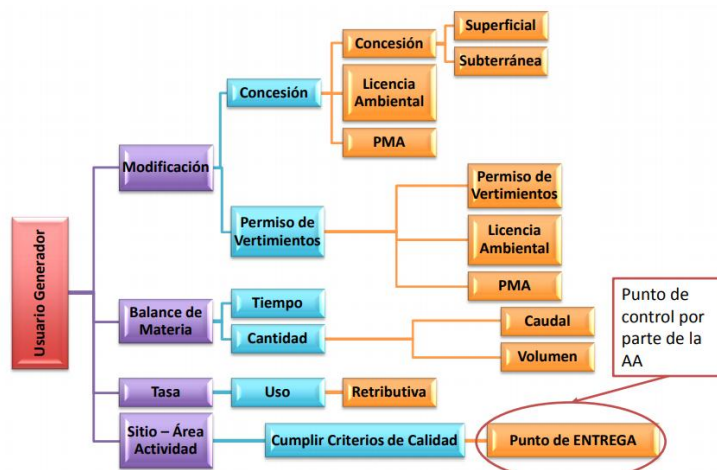
- El Usuario Receptor es el responsable de garantizar el cumplimiento de los criterios de calidad para el reúso de acuerdo con los usos establecidos en la Concesión de Aguas.

En el Artículo 4 de la resolución en mención se establece lo siguiente:

- Si la totalidad de las aguas residuales tratadas se entregan para reúso no se requerirá permiso de vertimiento por parte del Usuario Generador y no habrá lugar al pago de la correspondiente Tasa Retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales. En caso contrario si la entrega es parcial, deberá ajustarse el cobro conforme a la modificación del Permiso de Vertimientos.

En términos generales, el trámite a seguir ante la Autoridad Ambiental competente para la obtención del permiso de concesión tanto del usuario generador como del usuario receptor se representa en las siguientes figuras.

**Figura 29.** Trámites ante la autoridad ambiental por parte del Usuario Generador



**Fuente:** Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT

**Figura 30.** Trámites ante la autoridad ambiental por parte del Usuario Receptor



**Fuente:** Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT

Los Artículos 6 y 7 de la Resolución 1207 de 2014, establecen los usos establecidos para agua residual tratada y los criterios de calidad, específicamente para el sector agrícola se exige lo siguiente:

Usos de agua residual tratada para riego de:

- Cultivos de pastos y forrajes para consumo animal.
- Cultivos no alimenticios para humanos o animales.
- Cultivos de fibras celulósicas y derivados.
- Cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carburante) incluidos lubricantes.
- Cultivos forestales de madera, fibras y otros no comestibles.
- Cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos.

**Tabla 11.** Criterios de calidad establecidos para el uso de agua residual tratada para fines agrícolas

Variable	Unidad de Medida	Valor Limite Máximo Permisible
<b>FISICOS</b>		
pH	Unidades de pH	6,0 – 9,0
Conductividad	µS/cm	1.500,0
<b>MICROBIOLOGICOS</b>		
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	1,0*E(+5)
Enterococos Fecales	NMP/100 mL	1,0*E(2)
Helminfos Parásitos Humanos	Huevos y Larvas/L	1,0
Protozoos Parásitos Humanos	Quistes/L	1,0
<i>Salmonella sp</i>	NMP/100 mL	1,0
<b>QUIMICOS</b>		
Fenoles Totales	mg/L	1,5
Hidrocarburos Totales	mg/L	1,0
<b>Iones</b>		
Cianuro Libre	mg CN <sup>-</sup> /L	0,2
Cloruros	mg Cl <sup>-</sup> /L	300,0
Fluoruros	mg F <sup>-</sup> /L	1,0
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /L	500,0
<b>Metales</b>		
Aluminio	mg Al/L	5,0
Berilio	mg Be/L	0,1
Cadmio	mg Cd/L	0,01
Cinc	mg Zn/L	3,0
Cobalto	mg Co/L	0,05
Cobre	mg Cu/L	1,0
Cromo	mg Cr/L	0,1
Hierro	mg Fe/L	5,0
Mercurio	mg Hg/L	0,002
Litio	mg Li/L	2,5
Manganeso	mg Mn/L	0,2
Molibdeno	mg Mo/L	0,07
Niquel	mg Ni/L	0,2
Plomo	mg Pb/L	5,0
Sodio	mg Na/L	200,0
Vanadio	mg V/L	0,1
<b>Metaloides</b>		
Arsénico	mg As/L	0,1
Boro	mg B/L	0,4
<b>No metales</b>		
Selenio	mg Se/L	0,02
<b>Otros parámetros</b>		
Cloro Total Residual (con mínimo 30 minutos de contacto)	mg Cl <sub>2</sub> /L	Menor a 1,0
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N)	mg/L	5,0

**Fuente:** Resolución 1207 de 2014

Como actividades de prevención, la Resolución 1207 de 2014, establece lo siguiente:

**Figura 31.** Actividades de Prevención ante la autoridad ambiental por parte del Usuario Receptor



**Fuente:** Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT

### 7.1. Viabilidad de Reutilización del Agua Tratada para Fines Agrícolas

En el caso específico de las aguas residuales tratadas y provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Sotaquirá, es necesario realizar un análisis fisicoquímico y microbiológico de los efluentes, incluyendo la totalidad de los parámetros regulados en la Resolución 1207 de 2014, lo anterior para garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad exigidos para dicho fin y así poder determinar la viabilidad tanto de calidad como económica del reúso del recurso. En caso de que los parámetros sobrepasen lo estipulado en la normatividad aplicable, se puede contemplar la posibilidad de tomar acciones correctivas dentro del tratamiento, que garanticen el potencial de reúso del agua.

De igual forma, y en caso de ser viable en términos económicos y de calidad, destinar el agua residual tratada para fines agrícolas, se deben identificar los usuarios receptores del sector que se encuentren interesados, informarles de los requerimientos y trámites ante la autoridad ambiental competente (en este caso la

Corporación Autónoma Regional de Boyacá - Corpoboyacá) e iniciar los procedimientos según lo estipulado en la Resolución 1207 de 2014.

## 8. CONCLUSIONES

Una vez realizada la evaluación técnica y operativa a la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Sotaquirá, ubicado en el Departamento de Boyacá, se puede concluir que:

- Por medio de las visitas efectuadas a la PTAR, fue posible realizar un diagnóstico de la misma, en el cual se identificaron una serie de aspectos, todos relacionados con la falta de mantenimiento y seguimiento continuo en algunas de las unidades que conforman el sistema de tratamiento. En este orden de ideas se plantearon una serie de consideraciones técnicas y operativas para el mejoramiento del sistema de tratamiento de las aguas residuales del municipio.
- En términos generales, se observó que la zona se encuentra delimitada, cercada y con acceso restringido; de igual manera, la infraestructura de la PTAR se encuentra en buen estado ya que su construcción es relativamente reciente. Sin embargo, se recomienda realizar labores de limpieza y barrido a los senderos peatonales al interior de la planta y actividades periódicas de corte y poda de césped.
- Respecto al muestreo de tipo compuesto efectuado en la Entrada a la PTAR, Salida de Humedal de Flujo Sub-Superficial y Salida de Laguna de Maduración, se registraron valores de pH con características alcalinas, debido posiblemente a la presencia de bicarbonatos en el agua. En cuanto al cumplimiento normativo, se observó que los valores promedio obtenidos, se encuentran dentro de los límites máximo y mínimo establecidos en la Resolución 0631 de 2015. En cuanto a la Temperatura, se obtuvieron valores con mínimas variaciones y acordes a las condiciones climáticas de la zona, el Caudal medido registró valores acordes a las condiciones del sistema, los

cuales se encuentran relacionados con las actividades cotidianas de las personas que habitan en el municipio.

- En la Salida del Humedal de Flujo Sub-Superficial y Salida de la Laguna de Maduración, las concentraciones de los parámetros DBO<sub>5</sub> y SST, sobrepasaron los límites máximos establecidos en la Resolución 0631 de 2015; en cuanto al parámetro Aceites y Grasas, el valor arrojado en la Salida de la Laguna de Maduración cumple satisfactoriamente lo exigido legalmente. Respecto al porcentaje de remoción calculado, y teniendo en cuenta las concentraciones de entrada frente a las concentraciones de salida de los tratamientos, es posible afirmar que en términos de DBO<sub>5</sub> y Aceites y Grasas, el porcentaje de remoción tanto en la Salida del Humedal de Flujo Sub-Superficial como en la Salida de la Laguna de Maduración fue superior al 80%; mientras que para el parámetro SST, la eficiencia en los dos sistemas fue inferior al 35%, éstos resultados guardan coherencia con lo diagnosticado.
- Finalmente y teniendo en cuenta las concentraciones registradas del parámetro Coliformes Totales, se observó que a lo largo de las líneas de tratamiento, se logró una reducción significativa de la población bacteriana de tipo coliforme, entre la cual se encuentran algunos microorganismos patógenos.

## 9. RECOMENDACIONES

Una vez realizada la evaluación técnica y operativa a la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Sotaquirá, ubicado en el Departamento de Boyacá, es posible recomendar lo siguiente:

- Formular e implementar un manual de operación y mantenimiento, que presente los procedimientos esenciales para operar y mantener todas y cada una de las unidades de tratamiento existentes en la PTAR, lo anterior dirigido a los responsables y operadores del servicio; como documento técnico y como guía para la capacitación en operación y mantenimiento del sistema. Con la implementación del manual en mención se espera que constituya un instrumento útil en cuanto a mantener el buen funcionamiento, que satisfaga las expectativas y exigencias requeridas.
- Realizar controles y monitoreos periódicos en el afluente y efluente de la PTAR, lo anterior conforme a los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, exigidos por la normatividad ambiental vigente en materia de vertimientos domésticos. De igual manera, se recomienda realizar controles internos en cada una de las unidades de tratamiento, con el fin de determinar su eficiencia en cuanto a remoción en carga, lo cual permite evidenciar su buen funcionamiento.
- Estudiar a profundidad los lodos producidos y provenientes de los lechos del secado existentes en la PTAR, en busca de lograr su aprovechamiento y uso en actividades agrícolas y recuperación, restauración y mejoramiento de suelos degradados. Por lo anterior se deben caracterizar los lodos en mención conforme a lo establecido en el Decreto 1287 de 2014, por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.

- Determinar la viabilidad de reutilizar el agua residual tratada, por medio de un análisis fisicoquímico y microbiológico de los efluentes, incluyendo la totalidad de los parámetros regulados en la Resolución 1207 de 2014, lo anterior para garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad exigidos para dicho fin. En caso de que los parámetros sobrepasen lo estipulado en la normatividad aplicable, se recomienda contemplar la posibilidad de tomar acciones correctivas dentro del tratamiento que garanticen el potencial de reúso del agua.

## BIBLIOGRAFÍA

BRAVO MENDOZA, Willis Frend. Estructuras Complementarias de un Sistema de Lagunas de Estabilización para el Tratamiento de Aguas Residuales. [En línea]. Sincelejo, Sucre, 2007, 97 p. Trabajo de grado. (Ingeniero Civil). Universidad de Sucre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil. Disponible:(<http://biblioteca.unisucre.edu.co:8080/dspace/bitstream/123456789/372/1/T628.352%20B826.pdf>).

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA - CONAGUA. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Lagunas de Estabilización. [En línea]. [09 de septiembre de 2017] México. Disponible en: (<http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro27.pdf>)

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE BOYACÁ. Subdirección de Gestión Ambiental. Diseño de Planta Piloto de Aguas Residuales del Municipio de Sotaquirá – Departamento de Boyacá. 17 p.

CUERVO F., H. Fundamentos para el Análisis y Diseño de Proceso. Documento en prensa: capítulo Lagunas de estabilización. Medellín. Colombia.

GUTIÉRREZ, J. Reúso de agua y nutrientes. Centro de información, gestión y educación ambiental (Cigea). [En línea] [11 de septiembre de 2017]. Disponible en: ([www.medioambiente.cu/revistama/articulo41.htm](http://www.medioambiente.cu/revistama/articulo41.htm)).

IDEAM, 2004. Guía para toma, conservación y transporte de muestras de agua, [En línea], [18 de septiembre de 2017]. Disponible en: ([http://www.dinamol.gub.uy/descargas/doc\\_tecnicos/guia\\_toma\\_agua.pdf](http://www.dinamol.gub.uy/descargas/doc_tecnicos/guia_toma_agua.pdf)).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Gestión Ambiental. Calidad de Agua. Muestreo. Muestreo de Aguas Residuales. Bogotá: ICONTEC, 2003. (NTC-ISO-5667-10).

LARA, J. A. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Barcelona, España, 1998, 113 p. Trabajo final de maestría (Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental). Universidad Politécnica de Cataluña. Facultad de Ingeniería.

LLAGAS, W., GUADALUPE E. Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMM. [En línea], [20 de septiembre de 2017]. Disponible en: ([http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol9\\_n17/a11.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol9_n17/a11.pdf)).

MENA, J., RODRÍGUEZ, L., NÚÑEZ, J. F. Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos. Congreso Nacional de Medio Ambiente, CONAMA 2008. Madrid, España.

METCALF Y EDDY, Inc., Ingeniería Sanitaria, Redes de Alcantarillado y Bombeo de Aguas Residuales, Barcelona, Editorial Labor, S.A., Primera edición, 1985. p. 249-254.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL – MAVDT. Guía Práctica de Formulación de Proyectos de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Municipales. Colombia, 2002.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL – MAVDT. Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales en Colombia. Colombia, 2003.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES - MOPT, “Depuración por Lagunaje de Aguas Residuales, Manual de Operadores”, Madrid, 1991. 57-75 p.

MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Reglamento Técnico de Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2000. Título A-12 Definiciones. 2012. 110 p.

ÑIQUE, A. (2000). Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. [En línea] [01 de septiembre de 2017] Disponible en: ([http://www.Geocities.com/sociedadpga/publicaciones/anoInro1/humedales\\_tratamiento\\_aguas .htm](http://www.Geocities.com/sociedadpga/publicaciones/anoInro1/humedales_tratamiento_aguas.htm)).

PÉREZ O., GONZALEZ O., GONZALEZ, S. Estructura de películas biológicas en tratamiento de aguas residuales. Tratamiento de aguas en zonas industriales, urbanas y rurales, 2005, 150 p.

ROLIM MENDONÇA, Sergio. Sistemas de tratamiento de aguas en procesos anaerobios. Sao Paulo, 1999, 30 p. Trabajo de Grado (Ingeniero Civil). Escuela de Ingeniería de la Universidad de Paraíba. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil.

ROMERO, J. A. “Lagunas de Estabilización de Aguas Residuales”, Santa Fe de Bogotá, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2005, 108-121 p.

YÁÑEZ, F. Avances en el Tratamiento de Aguas Residuales por Lagunas de Estabilización. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, Perú: CEPIS, 1982. 28 p.

## **ANEXOS**

**ANEXO 1.** Plano PTAR Sotaquirá

**ANEXO 2.** Especificaciones de Diseño PTAR

**ANEXO 3.** Reportes de Laboratorio