

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA MODELO DE TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES PARA EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA**

**ANDRÉS LEONARDO ORJUELA PÉREZ  
EDDY SLEIDER RUBIO URREGO**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
TRABAJO DE GRADO  
BOGOTÁ D.C.  
2019**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA MODELO DE TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES PARA EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA**

**ANDRÉS LEONARDO ORJUELA PÉREZ  
EDDY SLEIDER RUBIO URREGO**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Civil**

**Director del Proyecto  
Ing. Jesús Ernesto Torres**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
TRABAJO DE GRADO  
BOGOTÁ D.C.  
2019**



## Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra  
hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de  
Aceptación

---

---

---

---

---

Director del Proyecto  
Ing. Jesús Ernesto Torres

---

Jurado

---

Jurado

Bogotá D. C., Mayo, 2019

*Primeramente agradezco a Dios por permitirme realizar uno de los tantos objetivos en mi vida, a mis padres por su apoyo incondicional, por estar siempre en los momentos difíciles, por darme las fuerzas para continuar ante las adversidades y por hacerme sentir capaz de todo lo que puedo lograr, a mi esposa e hija por fortalecerme día a día, por comprender mi ausencia en diferentes situaciones y sobre todo por estar siempre presentes para mí. Infinitas gracias.*

**LEONARDO ORJUELA**

*Dedico esta tesis a mi madre, quien con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a ser la persona que soy hoy en día, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, por acompañarme en momentos en que quizá no tenía las fuerzas de continuar, por haberme dado todo su apoyo a lo largo de mi carrera. A mí hermano por estar siempre presente y brindarme su apoyo moral. A la memoria de mi hermana. Gracias.*

**EDDY RUBIO**

## **AGRADECIMIENTOS**

Antes que nada, expresar nuestro agradecimiento a Dios por todas sus bendiciones, quien como guía, estuvo presente en todo momento de nuestra carrera universitaria.

Gracias, a nuestras familias por su apoyo incondicional.

Gracias, a nuestro docente asesor ingeniero Jesús Ernesto Torres, quien estuvo guiándonos con su experiencia y profesionalismo.

Gracias, al laboratorista Javier Mendoza, quien nos ayudó de la mejor manera.

Gracias a la Universidad Católica de Colombia por abrir sus puertas para la formación de íntegros profesionales.

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	17
2. GENERALIDADES .....	18
2.1 ANTECEDENTES .....	18
2.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	21
2.2.1 Descripción del problema .....	21
2.2.2 Formulación del problema .....	22
2.3 OBJETIVOS .....	22
2.3.1 Objetivo General .....	22
2.3.2 Objetivos Específicos .....	22
2.4 JUSTIFICACIÓN .....	23
2.5 ALCANCE Y LIMITACIÓN .....	24
2.5.1 Alcance.....	24
2.5.2 Limitación .....	24
2.6 MARCO DE REFERENCIA .....	24
2.6.1 Marco Teórico .....	24
2.6.1.1 Soluciones coloidales.....	25
2.6.1.2 Coagulación y floculación.....	25
2.6.1.2.1 Desestabilización .....	26
2.6.1.2.2 Mecanismos.....	26
2.6.1.3 Mezclado.....	27
2.6.1.4 Variables en el proceso fisicoquímico .....	27
2.6.1.4.1 Aceite y/o grasas .....	28
2.6.1.4.2 Ph .....	29
2.6.1.4.3 Sólidos Suspendidos .....	29
2.6.1.4.4 Metales Pesados .....	30
2.6.1.4.5 Alcalinidad .....	30
2.6.1.5 Equipo de Mezclado.....	30
2.6.1.6 Equipo de Mezclado (Floculación) .....	32
2.6.1.6.1 Hidráulicos .....	32
2.6.1.6.2 Mecánicos.....	32
2.6.1.7 Separación .....	33
2.6.1.8 Tratamiento físico.....	33
2.6.1.9 Tratamiento biológico .....	33
2.6.1.9 Tratamiento químico .....	34
2.6.1.10 Pre-tratamiento .....	34
2.6.1.11 Tratamiento primario .....	35
2.6.1.12 Tratamiento secundario biológico .....	36



2.6.1.13 Tratamiento terciario .....	37
2.6.1.14 Zanjón de Oxidación .....	39
2.8.1.14.1 Aireación .....	41
2.6.1.14.2 Sedimentador.....	42
2.6.1.14.3 Criterios generales para el diseño de tanques de sedimentación .....	42
2.6.1.14.4 Tipos de tanques de sedimentación: .....	43
2.6.1.14.5 Tanque secundario de sedimentación. ....	44
2.6.1.14.6 Tipos de Lodos .....	44
2.6.1.14.7 Características de los Lodos.....	44
2.6.1.14.8 Secado de Lodos .....	45
2.7 MARCO CONCEPTUAL.....	45
2.7.1 Aguas residuales (AR):.....	45
2.8 MARCO LEGAL .....	48
2.9 METODOLOGÍA .....	49
3. DISEÑO .....	50
3.1 ETAPA 1. ....	50
3.1.1 Diseño Zanjón de Oxidación .....	50
3.1.2 Diseño Sedimentador .....	58
3.2 ETAPA 2. PLANO ZANJÓN DE OXIDACIÓN .....	60
3.3 ETAPA 3. INSTALACIONES Y EQUIPO REQUERIDO .....	61
3.3.1 Instalaciones .....	61
3.3.2 Equipo .....	61
3.3.3 Proceso de Construcción .....	69
3.4 ETAPA 4. ENSAYOS DE LABORATORIO .....	79
3.4.1 Dureza del Agua.....	79
3.4.2 Solidos Totales.....	82
3.4.3 Test de Jarras .....	83
3.5 ETAPA 5 .....	90
3.5.1 Aireación del sistema .....	91
3.6 ETAPA 6 .....	92
3.6.1 Manual de Operación y Mantenimiento.....	92
4. CONCLUSIONES .....	95
5. RECOMENDACIONES.....	97
6. BIBLIOGRAFÍA.....	98

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. PARÁMETROS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES.....	46
TABLA 2. COMPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES.....	47
TABLA 3. PARÁMETROS DE DISEÑO PARA ZANJONES DE OXIDACIÓN.....	50
TABLA 4. CRITERIOS DE DISEÑO PARA EL ZANJÓN DE OXIDACIÓN.....	51
TABLA 5. CLASIFICACIÓN DE DUREZA DEL AGUA.....	79
TABLA 6. VOLÚMENES DE EDTA EMPLEADO EN LA TITULACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DUREZA TOTAL DE LA MUESTRA DE AGUA.....	80
TABLA 7. VOLÚMENES DE EDTA EMPLEADO EN LA TITULACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DUREZA CÁLCICA DE LA MUESTRA DE AGUA.....	81
TABLA 8. CONCENTRACIÓN DE LAS SUSTANCIAS EMPLEADAS.....	81
TABLA 9. RESULTADOS PERTINENTES AL ESTUDIO ESTADÍSTICO DEL VOLUMEN DE EDTA EMPLEADO PARA DETERMINAR LA DUREZA TOTAL DE LA MUESTRA.....	81
TABLA 10. RESULTADOS PERTINENTES AL ESTUDIO ESTADÍSTICO DEL VOLUMEN DE EDTA EMPLEADO PARA DETERMINAR LA DUREZA CÁLCICA DE LA MUESTRA.....	81
TABLA 11. RESULTADOS DE LA DUREZA DE AGUA OBTENIDOS.....	82
TABLA 12. PARÁMETROS PARA EL ENSAYO DE SÓLIDOS TOTALES.....	82
TABLA 13. DATOS DE ENTRADA PARA EL ENSAYO DE SÓLIDOS TOTALES.....	82
TABLA 14. RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL ENSAYO DE SÓLIDOS TOTALES.....	83
TABLA 15. RANGO DE CALIDAD DE AGUAS DE ACUERDO CON EL ÍNDICE GENERAL DE CONTAMINACIÓN.....	83
TABLA 16. RESULTADO COAGULANTE TIPO A VS. TURBIEDAD.....	84
TABLA 17. RESULTADO COAGULANTE TIPO B VS. TURBIEDAD.....	85
TABLA 18. RESULTADO COAGULANTE TIPO A VS. % REMOCIÓN.....	87
TABLA 19. RESULTADO COAGULANTE TIPO B VS. % REMOCIÓN.....	88
TABLA 20. TABLA DE RESULTADOS TIPO A.....	89
TABLA 21. TABLA DE RESULTADOS TIPO B.....	89
TABLA 22. RESULTADOS AGUA AL PASAR POR EL SISTEMA.....	91
TABLA 23. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA BOMBA DE AIREACIÓN.....	91

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL ZANJÓN. ....	52
FIGURA 2. ESQUEMA CORTE TRANSVERSAL Y VISTA PLANTA ZANJÓN. ....	55
FIGURA 3. ESQUEMA CORTE TRANSVERSAL SEDIMENTADOR. ....	58
FIGURA 4. CODOS PVC A 90° PARA TUBERÍA DE 1/2" ....	61
FIGURA 5. TUBERÍA PVC DE 3/8" ....	62
FIGURA 6. UNIONES DE PVC PARA TUBERÍA DE 1/2" ....	62
FIGURA 7. REGISTROS DE PASO TIPO BOLA PARA TUBERÍA DE 1/2" ....	63
FIGURA 8. ALICATE. ....	63
FIGURA 9. TALADRO. ....	64
.FIGURA 10. DESTORNILLADOR PUNTA DE ESTRELLA. ....	64
FIGURA 11. SIKA FLEX 221 COLOR BLANCO. ....	65
FIGURA 12. MANGUERA PLÁSTICA TRANSPARENTE DE 1/2" ....	65
FIGURA 13. ABRAZADERA METÁLICA PARA MANGUERA PLÁSTICA. ....	66
FIGURA 14. ACOPLÉ METÁLICO DE 1/2" ....	66
FIGURA 15. RESUMEN DE MATERIALES. ....	67
FIGURA 16. TANQUE RECOLECTOR DE AGUAS RESIDUALES. ....	67
FIGURA 17. ZANJÓN DE OXIDACIÓN. ....	68
FIGURA 18. BOMBA DE AGUA. ....	68
FIGURA 19. SEDIMENTADOR DE FLUJO CIRCULAR. ....	69
FIGURA 20. TANQUE SALIDA DE AGUA RESIDUAL. ....	69
FIGURA 21. SUCCIÓN Y ENTRADA DEL ZANJÓN. ....	70
FIGURA 22. ENTRADA Y SALIDA DEL SEDIMENTADOR. ....	71
FIGURA 23. ENSAMBLE DE BOMBAS. ....	72
FIGURA 24. CONSTRUCCIÓN TUBERÍA. ....	73
FIGURA 25. CONSTRUCCIÓN ESTRUCTURA SEDIMENTADOR. ....	74
FIGURA 26. RETORNO DE AGUA TRATADA. ....	75
FIGURA 27. MONTAJE PRELIMINAR. ....	75
FIGURA 28. AGUA RESIDUAL ....	76
FIGURA 29. ZANJÓN EN FUNCIONAMIENTO. ....	77
FIGURA 30. SEDIMENTADOR EN FUNCIONAMIENTO. ....	78
FIGURA 31. GRÁFICA COAGULANTE TIPO A VS. TURBIEDAD. ....	84
FIGURA 32. DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE TIPO A. ....	85
FIGURA 33. GRÁFICA COAGULANTE TIPO B VS. TURBIEDAD. ....	86
FIGURA 34. DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE TIPO B. ....	86
FIGURA 35. GRÁFICA COAGULANTE TIPO A VS. % REMOCIÓN. ....	87
FIGURA 36. GRÁFICA COAGULANTE TIPO B VS. % REMOCIÓN. ....	88
FIGURA 37. TEST DE JARRAS. ....	89

FIGURA 38. LECTURA INICIAL TURBIDEZ (APARATO FOTÓMETRO).....	90
FIGURA 39. LECTURA FINAL TURBIDEZ (APARATO FOTÓMETRO).....	90
FIGURA 40. BOMBA DE AIREACIÓN.....	91
FIGURA 41. SISTEMA EN OPERACIÓN.....	93
FIGURA 42. SEDIMENTACIÓN DE LODOS EN LA CÁMARA DE REBOSE DEL SEDIMENTADOR.....	93

## GLOSARIO

**AGUAS RESIDUALES:** “Las aguas residuales son el resultado del uso doméstico o industrial del agua, son llamadas también negras o cloacales. El agua usada constituye un residuo, algo que no sirve para el usuario directo; son negras por el color que habitualmente adquieren”<sup>1</sup>

**AIREACIÓN:** “La aireación es el proceso mediante el cual el agua se pone en contacto íntimo con el aire para modificar las concentraciones de sustancias volátiles contenidas en ella. Su función principal en el tratamiento de agua residuales es proporcionar oxígeno y mezcla en los procesos de tratamiento biológico aerobio.”<sup>2</sup>

**ALCALINIDAD:** “Indica la cantidad de componentes alcalinos (carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos) disueltos en el agua. La alcalinidad tiene un papel importante como efecto regulador de los cambios de Ph.”<sup>3</sup>

**CARGA SUPERFICIAL:** “Caudal o masa de un parámetro por unidad de área y por unidad de tiempo, que se emplea para dimensionar un proceso de tratamiento, m<sup>3</sup> / (m<sup>2</sup> día)”.<sup>4</sup>

**DESARENADORES:** “Cámara diseñada para permitir la separación gravitacional de sólidos minerales (arena)”.<sup>5</sup>

**FLOC:** “Es un conglomerado de partículas sólidas que se genera a través de los procesos de coagulación y floculación. El floc está constituido en primer lugar por los sólidos que se separan del agua, así como también por los sólidos que aporta el coagulante.”<sup>6</sup>

**FLOCULACIÓN:** “Es la aglomeración de partículas desestabilizadas en microfloculos y después en los floculos más grandes que pueden ser depositados llamados floculo. La adición de otro reactivo llamado floculante o una ayuda del floculante puede promover la formación del floculo.”<sup>7</sup>

---

<sup>1</sup> ROMERO ROJAS, Tratamiento de aguas residuales, libro, 2002

<sup>2</sup> ROMERO ROJAS, Tratamiento de aguas residuales, libro, 2002

<sup>3</sup> <http://www.piscinesdome.com/2016/11/que-es-la-alcalinidad/>, 2019

<sup>4</sup> ROMERO ROJAS, Tratamiento de aguas residuales, libro, 2002

<sup>5</sup> ROMERO ROJAS, Tratamiento de aguas residuales, libro, 2002

<sup>6</sup> <http://www.serquimsa.com/consideraciones-sobre-el-diseno-del-floc/>, 2019

<sup>7</sup> LENNTECH, 2016

**PH:** “El pH es una medida de acidez o alcalinidad que indica la cantidad de iones de hidrógeno presentes en una solución o sustancia.

Las siglas pH significan potencial hidrógeno o potencial de hidrogeniones, del latín *pondus*: peso, *potentia*: potencia e *hydrogenium*: hidrógeno, es decir *pondus hydrogenii* o *potentia hydrogenii*.”<sup>8</sup>

**TIEMPO DE RETENCON HIDRAULICO:** “Tiempo medio que se demoran las partículas de agua en un proceso de tratamiento. Usualmente se expresa como la razón entre en caudal y el volumen útil.”<sup>9</sup>

**TURBIEDAD:** “Indica la calidad de las aguas vertidas o naturales en relación con la materia coloidal y residual en suspensión.”<sup>10</sup>

**ZANJON DE OXIDACION:** “El zanjón de oxidación es un proceso de lodos activados, de tipo aireación prolongada, que usa un canal cerrado, con dos curvas, para la aireación y mezcla. Como equipo de aireación y circulación del licor mezclado usa aireadores mecánicos del tipo cepillos horizontales, de jaula o de discos.”<sup>11</sup>

---

<sup>8</sup> <https://www.significados.com/ph/>, 2013

<sup>9</sup> ROMERO ROJAS, Tratamiento de aguas residuales, libro, 2002

<sup>10</sup> METCALF & EDDY. Wastewater Engineering. Treatment and Reuse. 4 ed. Miami: McGraw Hill, 2004.

<sup>11</sup> ROMERO ROJAS, Tratamiento de aguas residuales, libro, 2002

## **RESUMEN**

El laboratorio de hidráulica de la facultad de ingeniería Civil de la Universidad Católica de Colombia tiene una gran necesidad de tratamiento de aguas residuales ya que no existe ningún sistema que permita tener un medio para tratar el agua residual generada en el laboratorio.

El presente trabajo, muestra los resultados de la investigación teórico experimental en donde se plantea el diseño y la construcción de una planta modelo de tratamiento de aguas residuales para el laboratorio de hidráulica por zanjón de oxidación, sólidos suspendidos totales en el efluente final para las prácticas estudiantiles del programa de Ingeniería Civil, con el respectivo manual de operaciones y mantenimiento de la planta; el diseño está compuesto por seis diferentes etapas, en la primera se establece el diseño de las dimensiones acordes a cada parte del proceso; en la segunda se realiza los planos digitales del modelo; en la tercer parte se lleva a cabo la construcción del modelo; en la cuarta etapa se desarrolla pruebas de laboratorio, en la quinta etapa se realiza pruebas a la planta modelo para garantizar su funcionamiento y finalmente en la etapa seis e crea la guía de laboratorio de la planta modelo. Al finalizar, con los resultados obtenidos, se genera conclusiones y recomendaciones.

### **PALABRAS CLAVES:**

PTAR, zanjón de oxidación, sedimentador, diseño, análisis y eficiencia.

### **ABSTRACT**

The hydraulic laboratory of the Faculty of Civil Engineering of the Catholic University of Colombia has a great need for wastewater treatment since there is no system that allows to have a means to treat the wastewater generated in the laboratory.

The present work, shows the results of the experimental theoretical research where the design and construction of a model wastewater treatment plant for the hydraulics laboratory for the oxidation, total suspended solids in the final effluent for the practices is solved. students of the civil engineering program, with the respective

manual of operations and maintenance of the plant; The design is composed of six different stages. in the second, the digital planes of the model are made; in the third part, the construction of the model is carried out; In the fourth stage laboratory tests are developed, in the fifth stage tests are carried out in the model plant to guarantee its operation and, finally, in stage six and create the laboratory guide of the model plant. At the end, with the results, conclusions and recommendations are generated.

**KEYWORDS:**

PTAR, oxidation ditch, sedimentation, design, analysis and efficiency.



## **1. INTRODUCCIÓN.**

En la actualidad, y con el crecimiento de las poblaciones, así como el avance en el desarrollo industrial, la generación de aguas residuales aumenta constantemente, siendo esta una de las principales causas de contaminación de afluentes, sistemas hídricos y ecosistemas, más aún cuando éstas no son tratadas adecuadamente, por esta razón se ha visto un gran esfuerzo por buscar métodos efectivos que permitan tratar y limpiar el agua, uno de estos métodos son las plantas de tratamiento, mediante las cuales se puede hacer la eliminación de sustancias no deseadas, para conservar el agua en buenas condiciones antes de ser vertidas o para su reutilización.

Por lo anterior, se quiere mediante el desarrollo del presente trabajo de grado, proponer un diseño y construcción de una planta modelo de tratamiento de aguas residuales para el laboratorio de hidráulica de la Universidad Católica de Colombia, para lo cual se realizará una investigación que costará de 6 etapas principales, en la primera se establece el diseño de las dimensiones acordes a cada parte del proceso; en la segunda se realiza los planos digitales del modelo; en la tercer parte se lleva a cabo la construcción del modelo; en la cuarta etapa se desarrolla pruebas de laboratorio, en la quinta etapa se realiza pruebas a la planta modelo para garantizar su funcionamiento y finalmente en la etapa seis e crea la guía de laboratorio de la planta modelo. Al finalizar, con los resultados obtenidos, se genera conclusiones y recomendaciones.

## 2. GENERALIDADES.

### 2.1 Antecedentes.

El tratamiento de aguas residuales, es un tema de gran relevancia, siendo una necesidad social el poder preservar los recursos hídricos para su utilización; al respecto Almudena Martín explica que “las aguas residuales pueden ser tratadas dentro del sitio en el cual son generadas, por ejemplo, con tanques sépticos u otros medios de depuración. Químicos como el hipoclorito sódico también se utilizan para eliminar algas y bacterias y obtener un agua pura y limpia; o utilizando una planta de tratamiento”<sup>12</sup>.

Al respecto, no solo en Colombia sino a nivel internacional se tienen herramientas como manuales y guías sobre el diseño y construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales, por ejemplo la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos publica periódicamente un manual titulado “Principles of Design and Operations of Wastewater”<sup>13</sup> (Principios de diseño y operaciones de tratamiento de aguas residuales), en el que se incluyen recomendaciones básicas de diseño, analiza las innovaciones en el diseño que se han realizado en sistemas nuevos, ampliados o modificados, así como los procesos adicionales que se han agregado para abordar los requisitos de nutriente; haciendo énfasis en la importancia de las operaciones y el mantenimiento.

En Colombia, el Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico, es el que “fija los criterios básicos y requisitos mínimos que deben reunir los diferentes procesos involucrados en la conceptualización, el diseño, la construcción, la supervisión técnica, la puesta en marcha, la operación y el mantenimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales”<sup>14</sup>, para garantizar que los sistemas de tratamiento de aguas residuales, sean seguros, durables, sostenibles, además de brinden calidad y eficiencia en su funcionamiento.

Sin embargo, existen varios tipos de plantas de tratamiento que se pueden construir dependiendo por ejemplo del nivel de complejidad de la misma, o del sitio en que

---

<sup>12</sup> MARTÍN, Almudena. El tratamiento de aguas residuales en Colombia [en línea]. Bogotá: Twenergy [citado 16 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://twenergy.com/co/a/el-tratamiento-de-aguas-residuales-en-colombia-1142>>

<sup>13</sup> U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Principles of Design and Operations of Wastewater Treatment Pond Systems for Plant Operators, Engineers, and Managers. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, 2011. p. 4

<sup>14</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. Tratamiento De Aguas Residuales, Título E. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento basico RAS. Bogotá: Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2000. P. E-5

va a prestar el servicio, por eso se han realizado investigaciones y estudios sobre el tema, uno de ellos el titulado “Design and Operation of MBR Type Sewage Treatment Plant at Lo Wu Correctional Institution, Hong Kong”<sup>15</sup> (Diseño y operación de una planta de tratamiento de aguas residuales tipo MBR en la institución correccional Lo Wu, Hong Kong), en este se muestra el resultado del diseño y construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales en una cárcel femenina que albergaba 1.400 prisioneras adultas, y que no disponía de alcantarillado público, razón por la que se construyó la planta y que adoptó la tecnología de biorreactor de membrana (MBR) dentro de LWCI para manejar las aguas residuales con un caudal promedio diseñado de 775 m<sup>3</sup>/d. La planta MBR fue diseñada con proceso de nitrificación y desnitrificación, presentando un buen rendimiento en la eliminación de sustancias orgánicas, sólidos, nutrientes, microorganismos, etc., cumpliendo con los requisitos de licencia de descarga estipulados por el Departamento de Protección Ambiental (EPD) del Gobierno de Hong Kong.

Igualmente, en la India la investigación titulada “Design of Laboratory Based Waste Water Treatment Plant” (Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales basada en laboratorio), dejó ver que el uso de los procesos convencionales de tratamiento de agua y aguas residuales se ve cada vez más desafiado con la identificación de más y más contaminantes, el rápido crecimiento de la población y las actividades industriales, y la disminución de la disponibilidad de recursos hídricos, por cuanto se hace necesario encontrar nuevas tecnologías para su tratamiento, que sean adecuadas y confiables, para lo cual en la investigación se presentó el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales a escala de laboratorio, que es una combinación de operaciones naturales y físicas tales como asentamiento primario con flujo de agua en cascada, aireación, agitación y filtración (filtro de medios dual), llamado proceso de tratamiento híbrido, observándose que en términos de reducción de la carga orgánica de contaminantes cloacales fue de DQO (80%), SDT (80%), TSS (81%) y dureza total (78%<sup>16</sup>). Así mismo encontraron beneficios como una baja demanda de energía, menos costos de operación y mantenimiento, menor carga en agua dulce, menos esfuerzo en el tanque séptico, purificación altamente efectiva y recarga de agua subterránea. Por lo tanto, se trata de una planta respetuosa con el medio ambiente, sin operaciones químicas, rentable e ingeniosa para el desarrollo rural.

A nivel académico, estudiantes de varias universidades han desarrollado trabajos de grado referentes al diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales, una de ellas es la realizada por estudiantes de la Universidad Nacional de San Marcos

---

<sup>15</sup> CHING, K. F. y HONG, Nelson. Design and Operation of MBR Type Sewage Treatment Plant at Lo Wu Correctional Institution, Hong Kong [en línea]. Hong Kong: Drainage Services Department (DSD) [citado 15 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: [https://www.dsd.gov.hk/EN/Files/Technical\\_Manual/technical\\_papers/ST11301.pdf](https://www.dsd.gov.hk/EN/Files/Technical_Manual/technical_papers/ST11301.pdf)>

<sup>16</sup> DHOTE, Jayashree; CHAVHAN, Arvind y INGOLE Sangita. Design of Laboratory Based Waste Water Treatment Plant. En: Int. Res. J. of Science & Engineering, march – jun, 2014. vol. 2, no. 3, p. 104

en Perú, titulada “Planta de tratamiento de aguas residuales en la Universidad Nacional Mayor e San Marcos, Lima Perú”, en la que se desarrolló el diseño de una planta de tratamiento para el agua residual producida en la Ciudad Universitaria, “por medio de un tratamiento anaeróbico para una carga de 1,00 L/s con una DBOs de 220 mg/L, el agua tratada fue reusada implementando un cárcamo de bombeo en donde se instaló una bomba de aproximadamente 1 HP de potencia para elevar el agua a nivel de filtración y efectuar el retrolavado”<sup>17</sup>.

Otro de estos trabajos fue el llevado a cabo por estudiantes de la Fundación Universidad de América, en donde se hizo un diseño conceptual de una planta de tratamiento de aguas residuales para el proceso de producción de pinturas de la empresa Pelikan<sup>18</sup>, a partir del diagnóstico del efluente por medio de un laboratorio externo, evaluando cada parámetro del agua para definir los parámetros críticos, y el desarrollo experimental mediante simulación para seleccionar la alternativa de tratamiento, las condiciones de operación y el dimensionamiento de los equipos necesarios.

Finalmente, y como aporte al cuidado del medio ambiente, en Colombia hay universidades que cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales en sus instalaciones, tal es el caso de la Universidad del Atlántico, que “cuenta con dos plantas de tratamiento para las aguas servidas generadas dentro de las actividades ejecutadas al interior de la misma”<sup>19</sup>, una con un Sistema Bioaumentación – Biodiscos y la otra con Sistema Biodigestores con lodos activados, el propósito de estas dos plantas es devolver al agua, propiedades para poder ser reutilizada en ciertas actividades, y así poder disminuir el impacto negativo asociado a la contaminación de este recurso.

Así mismo, la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, cuenta con una PTAR terciaria que despoja de contaminación orgánica y química (metales pesados), a través de un biodigestor anaeróbico y uno aeróbico de lodos activados, además posee una torre de absorción de carbón activado, que permite eliminar residuos de solventes orgánicos y trazas de fenoles y cloroformo lo cual garantiza la no contaminación del Humedal de Guaymaral, cercano a la Universidad. Esta PTAR provee a la Universidad, no solamente, de un avanzado sistema de tratamiento de todas sus aguas residuales, sino, además de una planta piloto, donde

---

<sup>17</sup> ERAZO, R. y CÁRDENAS, J.L. Planta de tratamiento de aguas residuales en la Universidad Nacional Mayor e San Marcos, Lima Perú. En: Revista Peruana de química e ingeniería química. Septiembre – octubre, 2007, vol. 3, no. 1, p. 46

<sup>18</sup> CRISTANCHO BELLO, Angie Julieth y NOY ORTIZ, Andrés Mauricio. Diseño conceptual de una planta de tratamiento de aguas residuales para Pelikan Colombia S.A.S. Bogotá: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Modalidad trabajo de grado, 2016.

<sup>19</sup> UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO. Tratamiento de Aguas Residuales [en línea]. Barranquilla: La Universidad [citado 17 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.uniatlantico.edu.co/uatlantico/node/306>>

sus estudiantes pueden practicar los métodos integrales de tratamientos de aguas residuales, de acuerdo a los programas académicos que tiene la Universidad en materia ambiental<sup>20</sup>.

## **2.2 Planteamiento y Formulación del Problema.**

### **2.2.1 Descripción del problema.**

Las aguas residuales son uno de los problemas más preocupantes en el país, ya que son el resultado de actividades humanas como bañarse, usar el inodoro, lavar, así como de actividades industriales y el uso de diferentes sustancias, lo que resulta en el agua llena de bacterias, químicos nocivos y toxinas y la mayoría de esta agua va a parar a los cuerpos de agua sin tratamiento alguno, esta problemática que se ha querido manejar a través de la implementación de estrategias orientadas a la reducción de su impacto, sin embargo, lo que se ha realizado es insuficiente frente a la dimensión del asunto. De acuerdo con el periódico La Vanguardia “en el país se presenta una inadecuada recolección, tratamiento y disposición de vertimientos de aguas residuales generadas por la agricultura, la industria, el uso doméstico; cada día están más contaminados los ríos y demás corrientes de agua, las aguas subterráneas, los humedales y las represas de agua, causando inenarrable daño ambiental y a la salud pública”<sup>21</sup>.

Así mismo, estudios han revelado que la construcción de sistemas de tratamientos de aguas en el país es una práctica relativamente reciente, ya que “en Colombia se trata el 10% de las aguas residuales”<sup>22</sup>, apenas el 31% de las ciudades cuenta con sistemas de tratamiento, y de ese porcentaje, el 29% es tratamiento primario<sup>23</sup>, es decir que eliminan los sólidos en suspensión presentes en el agua residual, mediante procesos físico-químicos como sedimentación, flotación, coagulación – floculación y filtración. Sumado a esto se tiene que “la mayoría de las plantas de tratamiento del país está fuera de funcionamiento por razones de costos de

---

<sup>20</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE EDUCACIÓN. La Udca cuenta con planta de tratamiento terciaria de aguas residuales [en línea]. Bogotá: El Ministerio [citado 17 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.mineduccion.gov.co/cvn/1665/w3-article-328613.html>>

<sup>21</sup> DIARIO LA VANGUARDIA. El problema de las aguas residuales [en línea]. Bogotá: El Diario [citado 17 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.vanguardia.com/opinion/editorial/379459-el-problema-de-las-aguas-residuales>>

<sup>22</sup> MARTÍN, Almudena. El tratamiento de aguas residuales en Colombia [en línea]. Bogotá: Twenergy [citado 16 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://twenergy.com/co/a/el-tratamiento-de-aguas-residuales-en-colombia-1142>>

<sup>23</sup> MARTÍN, Almudena. El tratamiento de aguas residuales en Colombia [en línea]. Bogotá: Twenergy [citado 16 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://twenergy.com/co/a/el-tratamiento-de-aguas-residuales-en-colombia-1142>>

operación y mantenimiento, descuido, desinterés, y falta de capacitación para mantenerlas en operación, entre otras razones”<sup>24</sup>.

La anterior problemática se genera no sólo desde los hogares e industrias, sino desde las instituciones educativas como las universidades, ya que en éstas se realizan actividades y desarrollan procesos que resultan en la generación de aguas residuales, tal es el caso de los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia, en donde se hace uso de diferentes sustancias para las prácticas estudiantiles del programa de Ingeniería Civil, razón por la cual se ve la necesidad desarrollar estrategias que mitiguen y/o reduzcan el impacto que se pueda estar generando desde la universidad por la generación de aguas residuales, y una de las mejores alternativas, es la construcción de una planta de tratamiento PTAR, ya que éstas proporcionan un tratamiento de mantenimiento confiable, de bajo costo y relativamente bajo para descargas; por lo que en este trabajo se quiere diseñar y construir una planta de tratamiento de aguas residuales para los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad.

## **2.2.2 Formulación del problema.**

¿Cuál es el mejor modelo de planta de tratamiento de aguas residuales, para el laboratorio de hidráulica en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Colombia?

## **2.3 Objetivos.**

### **2.3.1 Objetivo General.**

Diseñar y construir una planta modelo de tratamiento de aguas residuales para el laboratorio de hidráulica para la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Colombia.

### **2.3.2 Objetivos Específicos**

- Llevar a cabo la implementación de la etapa uno del proyecto, donde se establecen las estructuras como lo son zanjón de oxidación, sedimentador y tanque de almacenamiento.

---

<sup>24</sup> REVISTA PORTAFOLIO. Análisis/Aguas residuales y ciudades del futuro [en línea]. Bogotá: La Revista [citado 17 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.portafolio.co/opinion/redaccion-portafolio/analisis-aguas-residuales-ciudades-futuro-70248>>

- Realizar la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua residual titulada en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Colombia.
- Proponer un diseño de planta de tratamiento de aguas residuales, según las necesidades de la Universidad.
- Construir el prototipo de planta de tratamiento de aguas residuales realizando pruebas de funcionamiento y efectividad del tratamiento.

## **2.4 Justificación.**

Como se puede observar, existen varios antecedentes que soportan el tema de investigación que se quiere seguir para la realización del proyecto de grado, más aún, la oportunidad de poder generar un aporte significativo para las instalaciones de la universidad como medio para aportar al medio de ambiente, sino como mecanismo práctico en la formación académica de sus estudiantes, pues al igual que la planta de tratamiento de la UDCA, la planta que se va a proponer para la el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Católica de Colombia, tendría doble propósito, por un lado, tener un medio para tratar el agua residual generada en el laboratorio, y por el otro, un equipo con el que los estudiantes puedan realizar prácticas y aumentar su nivel académico.

Igualmente, con el diseño y construcción de la planta de tratamiento, se pretende brindar un aporte al cuidado del medio ambiente, así como cumplir las normas de saneamiento básico que rigen nuestro país, y que, como institución de formación profesional, está en el deber de promover prácticas de desarrollo sostenible y desempeño ambiental, que generen modelos a seguir y ejemplo de manejo ambiental.

Finalmente, el desarrollo del proyecto de grado, permitirá a sus autores, no sólo aplicar los conocimientos adquiridos durante la formación profesional, sino tener una visión más clara y real de lo que implica la construcción de una planta de tratamiento, y de los beneficios que con ésta se pueda lograr no solo para la universidad sino para la sociedad en general.

## **2.5 Alcance y Limitación.**

### **2.5.1 Alcance.**

Implementar el primer modelo para el tratamiento de aguas residuales en el laboratorio de hidráulica en la Universidad, con sus respectivos planos de diseño, memorias de cálculo y manual de operación.

### **2.5.2 Limitación.**

- Limitación en el tiempo requerido para la realización de los ensayos físico químicos del agua residual generada, teniendo en cuenta la duración de cada uno de ellos, por lo que se puede afectar el cumplimiento de las fechas establecidas por la universidad.
- Disponibilidad del laboratorio para la realización del montaje de la planta modelo.
- Capacidad y disponibilidad de tiempo en el laboratorio, cantidad de materiales químicos para realizar los diferentes ensayos de laboratorio requeridos.

## **2.6 Marco de Referencia.**

### **2.6.1 Marco Teórico.**

“Los procesos para el Tratamiento de aguas residuales se basan en la eliminación de los contaminantes hasta alcanzar los valores máximos permisibles de acuerdo a las normas y estándares nacionales o internacionales. En virtud de la diversidad de contaminantes que se pueden presentar en las aguas residuales, el número de procesos existentes es también muy amplio, no obstante estos procesos se pueden agrupar de acuerdo al tipo de fenómeno o principio en el cual basan su operación.



Una clasificación amplia en la que se puede agrupar los procesos de tratamientos, es aquella que está de acuerdo al tipo de fenómeno asociado:

- Físico.
- Químico.
- Bioquímico.
- Físico-químico.
- Enzimático.

#### **2.6.1.1 Soluciones coloidales.**

Las soluciones coloidales se caracterizan por estar constituidas por una dispersión de partículas sólidas o líquidas en agua y que son difíciles de eliminar utilizando procedimientos como pueden ser gravedad, filtración y otros.

El tamaño de las partículas oscila entre 0.01 a 5 micras y son bastante estables de tal forma que pueden permanecer en dicha condición por bastante tiempo.

Esta estabilidad se logra mediante un fenómeno físico-químico de cargas eléctricas entre las partículas dispersas y se explica de acuerdo a la teoría de doble capa conocida como Teoría DLVO (Derjaquin, Landau Verwery y Oberbeek)<sup>25</sup>.

Prácticamente en la mayor parte de las industrias se pueden presentar este tipo de soluciones sobre todo cuando existen compuestos del tipo emulsificantes, los que favorecen la formación de soluciones coloidales que en el caso de ser de partículas líquidas se conocen como emulsiones.

#### **2.6.1.2 Coagulación y floculación.**

---

<sup>25</sup> TRATAMIENTO FÍSICO – QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES. Servi Aqua Móvil S.A. [en línea]. Bogotá: Artículo [citado 25 Abril, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicona/R-0196.pdf> >

### **2.6.1.2.1 Desestabilización.**

“El fenómeno mediante el cual se logra desestabilizar el coloide y su aglomeración posterior, es lo que se conoce como coagulación y floculación, de hecho es un proceso en dos etapas.

En la primera etapa de coagulación se elimina la doble capa eléctrica que caracteriza a los coloides, y la floculación se da a continuación y consiste básicamente en la aglomeración de los coloides mediante la atracción de las partículas con el aglutinamiento que se logra por la presencia de sustancias conocidas como floculantes.

La coagulación-floculación de los coloides se puede lograr mediante uno o varios de los siguientes mecanismos:

- Compresión de la doble capa.
- Neutralización de la carga.
- Aglutinamiento.
- Entrampamiento.

### **2.6.1.2.2 Mecanismos.**

Los mecanismos que se presentan en el tratamiento de aguas, son los tres últimos y normalmente la coagulación-floculación se logra con la presencia de dos de ellos.

La neutralización de la carga se logra mediante la adición de una sustancia denominada coagulante y que puede ser algún polímero inorgánico u orgánico de naturaleza catiónica.

Las cantidades que normalmente se requieren son bajas y un exceso de coagulante favorece para que la solución coloidal se haga más estable.

El aglutinamiento normalmente es un mecanismo que se desea realizar una vez que las cargas eléctricas hayan sido neutralizadas. Esto se puede lograr con la adición de un polímero que permita que los flóculos se vayan aglomerando”<sup>26</sup>.

“El entrampamiento es tal vez uno de los mecanismos más utilizados sobre todo cuando las soluciones son muy estables. Este se logra mediante la formación de un flóculo de algún hidróxido de aluminio o de hierro, bajo condiciones controladas de concentración y pH. Este flóculo arrastra los coloides y los entrapa dentro de su red para así eliminarlos.

### **2.6.1.3 Mezclado.**

En la práctica, una de las variables más importantes para lograr la floculación de los coloides es el mezclado.

En general se distinguen dos tipos de mezclado necesarios para lograr el fenómeno, primero un mezclado rápido para lograr la desestabilización de las partículas y segundo un mezclado lento que favorezca una variación gradual del gradiente del flujo. Este último es el requerido para llevar a cabo la floculación.

### **2.6.1.4 Variables en el proceso fisicoquímico.**

Las operaciones que se llevan a cabo en el proceso físico-químico para el tratamiento de una solución coloidal son:

- Mezclado.
- Coagulación.
- Floculación.
- Separación.

---

<sup>26</sup> TRATAMIENTO FÍSICO – QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES. Servi Aqua Móvil S.A. [en línea]. Bogotá: Artículo [citado 25 Abril, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicona/R-0196.pdf> >

Cada una de estas operaciones tiene sus variables de diseño u operación definidas y para lograr un buen resultado, es necesario que las variables estén dentro de los límites que establece el proceso.

Las dos primeras operaciones, mezclado – coagulación, se deben considerar como una sola, ya que después del mezclado se logra la coagulación”<sup>27</sup>.

Las variables que intervienen y que hay que considerar para lograr una buena operación son:

- Aceite y/o grasas presentes.
- pH.
- Sólidos suspendidos.
- Metales presentes.
- Alcalinidad.

Variables del equipo:

- Tipo de equipo.
- Parámetros específicos.

#### **2.6.1.4.1 Aceite y/o grasas.**

“La presencia de grasas y aceites principalmente en estado de aceite libre, es inadecuado para el tratamiento de una solución coloidal. Una de las principales

---

<sup>27</sup> TRATAMIENTO FÍSICO – QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES. Servi Aqua Móvil S.A. [en línea]. Bogotá: Artículo [citado 25 Abril, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicona/R-0196.pdf> >

razones es que durante el proceso físico-químico se requiere de agitación y el aceite libre normalmente tiende a emulsificarse, por lo que si el propósito del tratamiento es romper la emulsión, esto no se lograría totalmente si se incorpora más aceite en la emulsión.

Por lo anterior es indispensable que antes de tratar la emulsión, se separe mediante medios convencionales todo el aceite libre presente en la mezcla.

#### **2.6.1.4.2 Ph.**

El pH de la solución, es muy importante y requerirá normalmente de un ajuste antes de iniciar el tratamiento.

Como se ha señalado en el inciso anterior, una de las formas más comunes de efectuar la coagulación, es la utilización de sales de aluminio y/o fierro, para precipitar los hidróxidos correspondientes, siguiendo el mecanismo de entrapamiento”<sup>28</sup>.

Esto ha sido motivo de muy diversos estudios en los cuales se ha determinado las condiciones bajo las cuales se logran formar los hidróxidos más estables en solución. En términos generales el pH es una de las variables más importantes y los valores deben de ser de alrededor de 5 – 7.5 para estos compuestos.

#### **2.6.1.4.3 Sólidos Suspendidos.**

“Los sólidos suspendidos en la solución pueden ser en muchos casos un obstáculo para utilizar los equipos en forma eficiente. Esto es aplicable a bombas y mezcladores en línea.

En algunos casos la presencia de sólidos puede ayudar a obtener una floculación más efectiva, por lo que se deberá considerar la opción de manejarlo con sólidos. En caso de ser atractiva esta situación, el sistema deberá diseñarse con equipo específico para el manejo de sólidos, el cual por lo general tiene un costo mayor.

---

<sup>28</sup> TRATAMIENTO FÍSICO – QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES. Servi Aqua Móvil S.A. [en línea]. Bogotá: Artículo [citado 25 Abril, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicona/R-0196.pdf> >

Para cualquier otra situación es necesario eliminar los sólidos mediante trampas de sólidos, separadores de placa, mallas, tambores con mallas o filtros.

#### **2.6.1.4.4 Metales Pesados.**

En el caso de tenerse metales pesados, se deberán determinar las características de la solución en cuanto a su composición y condiciones de precipitación del metal o metales.

Normalmente la eliminación de los metales es prioritaria por lo que el sistema de tratamiento se deberá diseñar en torno a sus condiciones.

Existen amplias referencias que señalan las condiciones de precipitación óptima de los metales, por lo que es conveniente su utilización para fijar las áreas de operación.

#### **2.6.1.4.5 Alcalinidad.**

La alcalinidad presente en el agua residual, es muy importante, pues como se señaló con anterioridad el pH del agua tratada es clave en el resultado final<sup>29</sup>.

Otra de las variables que es necesario controlar, es la concentración del coagulante en el agua residual. Para lograr esto y al mismo tiempo cumplir con el pH final, es necesario realizar un ajuste previo mediante la adición de ácido en caso de que la alcalinidad sea alta o bien mediante la adición de una base cuando el pH es bajo.

#### **2.6.1.5 Equipo de Mezclado.**

“Existe una gran variedad de equipo de mezclado que puede utilizarse para efectuar la mezcla rápida requerida para llevar a cabo la coagulación. La selección del equipo estará en función del flujo del agua a tratar y la economía del sistema. Cuando el mezclado se realiza mediante un equipo convencional de tanque con agitación, el

---

<sup>29</sup> TRATAMIENTO FÍSICO – QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES. Servi Aqua Móvil S.A. [en línea]. Bogotá: Artículo [citado 25 Abril, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicona/R-0196.pdf> >

criterio para su dimensionamiento está en función del gradiente de velocidad requerido durante el mezclado, el cual se estima mediante la siguiente ecuación:

$$G = \sqrt{\frac{P}{V * \vartheta}}$$

Dónde:

G= Gradiente de velocidad

P= Potencia del agitador

V= Volumen del tanque

$\vartheta$  = Viscosidad cinemática

Esta ecuación fue definida desde 1943 por Camp and Stein y se continúa utilizando como la mejor alternativa, habiéndose definido los valores requeridos para obtener una operación eficiente.

Existe bastante información experimental y en manuales de diseño donde se dan valores recomendados para los diversos tipos de mezclado”<sup>30</sup>.

Los principales sistemas de mezclado rápido que se utilizan son:

- Tanques con agitadores.
- Inyección de reactivos en tubería mediante tobera.
- Turbina en línea.
- Mezcladores en línea.

---

<sup>30</sup> TRATAMIENTO FÍSICO – QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES. Servi Aqua Móvil S.A. [en línea]. Bogotá: Artículo [citado 25 Abril, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicona/R-0196.pdf> >

- Mezcladores estáticos.

Para todos estos sistemas se ha derivado las ecuaciones para estimar los valores de los Gradientes de Velocidad  $G$  y poder aplicar los criterios definidos.

#### **2.6.1.6 Equipo de Mezclado (Floculación).**

“La floculación, como se señala en uno de los incisos anteriores, es el proceso en el cual las pequeñas partículas que se han formado durante la desestabilización de la solución aumentan de tamaño mediante la unión de varias partículas de todo el sistema.

Esto se logra mediante un proceso de agitación lenta a lo largo de varios minutos de contacto. Una agitación violenta destruirá los flóculos firmados en un principio por lo que la agitación se deberá mantener dentro de ciertos valores. Nuevamente una medida de la agitación está dado por el gradiente de velocidad  $G$  y los valores  $Gt$  han sido determinados por diversos investigadores.

Los sistemas utilizados para efectuar la floculación son esencialmente de dos tipos:

- Hidráulicos.
- Mecánicos.

##### **2.6.1.6.1 Hidráulicos.**

Los sistemas hidráulicos mantienen, mediante un flujo por gravedad con variaciones en área y dirección, el gradiente de velocidad necesario para realizar la floculación. Entre los principales sistemas se encuentran los floculadores con mamparas de diversos diseños y camas empacadas.

##### **2.6.1.6.2 Mecánicos.**



En estos sistemas el gradiente de velocidad requerido se proporciona mediante la agitación lenta que se realiza en el agua parcialmente tratada. El equipo utilizado son diversos, agitadores con aspas de dimensiones grandes, agitadores tipo rueda con paletas<sup>31</sup>.

#### **2.6.1.7 Separación.**

La separación de los sólidos que se han formado en el proceso coagulación-floculación, se logra mediante procesos convencionales o combinación de varios. Entre los principales están:

- Sedimentación por gravedad.
- Placas separadoras.
- Filtros.
- Centrífugas.

El proceso de separación es también clave para lograr una buena operación por lo que requiere de un análisis detallado para seleccionar el sistema a utilizar dentro de una gama muy abundante.

#### **2.6.1.8 Tratamiento físico.**

Tamizado - Remoción de gas – Remoción de arena – Precipitación con o sin ayuda de coagulantes o floculantes – Separación y filtración de sólidos.

#### **2.6.1.9 Tratamiento biológico.**

Lechos oxidantes o sistemas ecológicos – post-precipitación – liberación al medio de efluentes, con o sin desinfección según las normas de cada jurisdicción – La

---

<sup>31</sup> TRATAMIENTO FÍSICO – QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES. Servi Aqua Móvil S.A. [en línea]. Bogotá: Artículo [citado 25 Abril, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicona/R-0196.pdf> >

biodigestión aerobia, anaeróbica y los humedales artificiales utilizan la materia orgánica biodegradable de las aguas residuales, como nutrientes de una población bacteriana, a la cual se le proporcionan condiciones artificiales para su crecimiento, de esta manera se remueve la materia contaminante.

#### **2.6.1.9 Tratamiento químico.**

Aplicación de productos químicos para la eliminación o conversión de los contaminantes – Precipitación, adsorción y desinfección.

Las aguas residuales domésticas se generan en residencias, instituciones y locales comerciales e industriales. Estas pueden tratarse en el sitio donde se generan (por ejemplo, fosas sépticas, filtros anaerobios u otros medios de depuración) o bien pueden ser recogidas y llevadas mediante una red de tuberías –y eventualmente bombas– a una planta de tratamiento municipal”<sup>32</sup>.

“Los esfuerzos para recoger y tratar las aguas residuales domésticas de la descarga habitualmente están sujetos a regulaciones y normas locales, estatales y federales (regulaciones y controles). A menudo ciertos contaminantes de origen industrial presentes en las aguas residuales requieren procesos de tratamiento especializado.

Por otro lado, se encuentran las aguas residuales de la industria y agroindustria las que están obligadas por normatividad a tener sus propios sistemas de tratamiento.

Si bien los procesos aplicados para la limpieza del agua dependen del estado, contexto, herramientas y futuro uso deseado para la misma, de forma general se pueden asegurar 4 pasos en una PTAR: El pre-tratamiento, tratamiento primario, el tratamiento secundario y el tratamiento terciario.

#### **2.6.1.10 Pre-tratamiento.**

---

<sup>32</sup> AQUATEC WATER TECHNOLOGIES. La importancia de una planta de tratamiento de agua residual hacia el ambiente [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 18 marzo, 2018]. Disponible en internet: <URL: <http://aquatec.com.pa/2016/10/21/la-importancia-de-una-planta-de-tratamiento-de-agua-residual-hacia-el-ambiente/>>

Sistemas de enfriamiento, remoción de sólidos flotantes mediante rejillas, remoción de arenas y grasas.

- **Remoción de sólidos o cribado.**

Los sólidos que se remueven son de gran tamaño por medio de rejillas grandes para evitar problemas de taponamiento de tuberías o que lleguen a dañar algún equipo.

- **Remoción de arena.**

Esta etapa (también conocida como escaneo o maceración) típicamente incluye un canal de arena donde la velocidad de las aguas residuales es cuidadosamente controlada para permitir que la arena y las piedras de ésta tomen partículas, pero todavía se mantiene la mayoría del material orgánico con el flujo.

#### **2.6.1.11 Tratamiento primario.**

Este tratamiento es para reducir principalmente sólidos sedimentables.

- **Sedimentación.**

Muchas plantas tienen una etapa de sedimentación donde el agua residual se pasa a través de grandes tanques circulares o rectangulares con tiempos de retención suficientes para que las partículas sólidas sean separadas por gravedad<sup>33</sup>.

La sedimentación es un proceso físico que aprovecha la diferencia de densidad y peso entre el líquido y las partículas suspendidas.

---

<sup>33</sup> ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA. Tratamiento De Aguas Residuales [en línea]. Medellín: La Universidad [citado 18 marzo, 2018]. Disponible en internet: <URL: [http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/interesantes /tratamientoresiduales/tratamientoresiduales.html](http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/interesantes/tratamientoresiduales/tratamientoresiduales.html)>

Los sólidos, más pesados que el agua, se precipitan produciéndose su separación del líquido. Estos tanques son comúnmente llamados clarificadores primarios o tanques de sedimentación primarios.

Los tanques son lo suficientemente grandes, tal que los sólidos fecales pueden depositarse y el material flotante como la grasa que no ha sido retenida en el pre tratamiento sea retenida en este proceso.

El propósito principal de la etapa primaria es producir un líquido homogéneo capaz de ser tratado biológicamente y unos fangos o lodos que pueden ser tratados separadamente<sup>34</sup>.

- **Tanque de homogenización.**

Estos tanques son concebidos para reducir los picos de caudal, temperatura, pH y contenidos orgánicos para ser introducidos de manera homogénea en los reactores para su tratamiento.

#### **2.6.1.12 Tratamiento secundario biológico**

El tratamiento secundario está diseñado para degradar sustancialmente el contenido biológico del agua residual, el cual deriva los desechos orgánicos provenientes de residuos humanos, residuos de alimentos, jabones, detergentes y en general residuos orgánicos de procesos industriales. La mayoría de las plantas municipales utilizan procesos biológicos aeróbicos para este fin.

- **Fangos activados o lodos activados.**

El nombre del proceso se deriva de la formación de una masa de "microorganismos activos" capaz de estabilizar un desecho orgánico en

---

<sup>34</sup> AQUATEC WATER TECHNOLOGIES. La importancia de una planta de tratamiento de agua residual hacia el ambiente [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 18 marzo, 2018]. Disponible en internet: <URL: <http://aquatec.com.pa/2016/10/21/la-importancia-de-una-planta-de-tratamiento-de-agua-residual-hacia-el-ambiente/>>

condiciones aerobias (el ambiente aerobio se logra mediante aireación difusa o mecánica en un tanque de aireación). En esencia es la agitación y aireación de una mezcla de agua residual y lodos biológicos, a medida que las bacterias reciben el oxígeno, consumen la materia orgánica del agua residual y la transforma en sustancias más simples. Este caldo bacteriano recibe el nombre de lodo activado. La mezcla de lodos activados y agua residual recibe el nombre de licor mezclado que se lleva a un tanque de sedimentación para su purga<sup>35</sup>.

- **Reactor biológico de cama móvil.**

El reactor biológico de cama móvil (MBBR, por sus siglas en inglés) asume la adición de medios inertes en vasijas de fangos activos existentes para proveer sitios activos para que se reúna la biomasa. Esta conversión da como resultado un sistema de crecimiento”<sup>36</sup>.

- **Reactores biológicos de membrana.**

“Los reactores biológicos de membrana MBR son un sistema con una barrera de membrana semipermeable o en conjunto con un proceso de fangos. Esta tecnología garantiza la remoción de todos los contaminantes suspendidos y sólidos disueltos. La limitación de los sistemas MBR es directamente proporcional a la eficaz reducción de nutrientes del proceso de fangos activos.

- **Sedimentación secundaria.**

El paso final de la etapa secundaria del tratamiento es retirar los flóculos biológicos del material de filtro, y producir agua tratada con bajos niveles de materia orgánica y materia suspendida. En una planta de tratamiento rural, se realiza en el tanque de sedimentación secundaria.

### **2.6.1.13 Tratamiento terciario.**

---

<sup>35</sup> MOBIUS. ¿Qué es una PTAR – Planta de Tratamiento de Aguas Residuales? [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 18 marzo, 2018]. Disponible en internet: <URL: <http://mobiuss.net.co/que-es-una-ptar/>>

<sup>36</sup> AQUATEC WATER TECHNOLOGIES. La importancia de una planta de tratamiento de agua residual hacia el ambiente [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 18 marzo, 2018]. Disponible en internet: <URL: <http://aquatec.com.pa/2016/10/21/la-importancia-de-una-planta-de-tratamiento-de-agua-residual-hacia-el-ambiente/>>

El tratamiento terciario proporciona una etapa final para aumentar la calidad del efluente al estándar requerido antes de que éste sea descargado al ambiente receptor (mar, río, lago, campo, etc.). Se trata de remover nitrógeno o fósforo del efluente tratado u otros contaminantes difíciles a remover.

- **Filtración.**

La filtración de arena retiene gran parte de los residuos de materia suspendida. El carbón activado sobrante de la filtración retiene las toxinas residuales.

- **Lagunaje.**

“El tratamiento de lagunas proporciona sedimentación y mejora biológica adicional por almacenaje en charcos o lagunas artificiales. Se trata de una imitación de los procesos de autodepuración que un río o un lago somete las aguas residuales de forma natural. Estas lagunas son altamente aerobias y se da a menudo la colonización por macrofitos nativos, especialmente cañas”<sup>37</sup>.

- **Desinfección.**

“El propósito de la desinfección en el tratamiento de las aguas residuales es reducir substancialmente el número de organismos vivos en el agua que se descargará nuevamente dentro del ambiente. La efectividad de la desinfección depende de la calidad del agua que es tratada (por ejemplo: turbiedad, pH, etc.), del tipo de desinfección que es utilizada, de la dosis de desinfectante (concentración y tiempo), y de otras variables ambientales. El agua turbia será tratada con menor éxito puesto que la materia sólida puede blindar organismos, especialmente de la luz ultravioleta o si los tiempos del contacto son bajos. Generalmente, tiempos de contacto cortos, dosis bajas y altos flujos influyen en contra de una desinfección eficaz. Los métodos comunes de desinfección incluyen el ozono, la clorinación, o la luz UV”<sup>38</sup>.

---

<sup>37</sup> AQUATEC WATER TECHNOLOGIES. La importancia de una planta de tratamiento de agua residual hacia el ambiente [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 18 marzo, 2018]. Disponible en internet: <URL: <http://aquatec.com.pa/2016/10/21/la-importancia-de-una-planta-de-tratamiento-de-agua-residual-hacia-el-ambiente/>>

<sup>38</sup> AQUATEC WATER TECHNOLOGIES. La importancia de una planta de tratamiento de agua residual hacia el ambiente [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 18 marzo, 2018]. Disponible en internet: <URL:

### 2.6.1.14 Zanjón de Oxidación.

“Zanjón de oxidación es un proceso de lodos activados del tipo de aireación prolongada, que usa un canal cerrado, con dos curvas, para la aireación y mezcla. Usa aireadores mecánicos del tipo de cepillos horizontales, de jaula o de discos.

Los tratamientos primarios tales como rejillas y desarenadores normalmente preceden a las zanjas de oxidación. Algunas veces se incluye sedimentación primaria antes de las zanjas, pero este no es el diseño típico. Se pueden necesitar filtros terciarios después de la sedimentación dependiendo de los requisitos de descarga del efluente. La desinfección es requerida y puede necesitarse re aireación antes de la descarga final. El agua que fluye por las zanjas de oxidación es aireada y mezclada con lodo recirculado del sedimentador secundario.

El zanjón de oxidación lo desarrollo Pasveer en 1953, en Holanda, y dos años después se puso en operación el primer prototipo en voorschoten. En 1956, en nittenan, se construyó el primer zanjón alemán.

El objetivo principal de su desarrollo fue proveer un método de tratamiento de aguas residuales de costo mínimo, e inicialmente los rotores se instalaron en zanjones excavados en tierra, los primeros zanjones de oxidación, de los estados unidos se construyeron a comienzos de década de los setenta, principalmente para el tratamiento de caudales ente  $1 \frac{l}{s}$  y  $1,8 \frac{m^3}{s}$ .<sup>39</sup>

Parámetros de diseño:

- No incluye sedimentación primaria
- Utiliza un solo canal concéntrico
- Sedimentador secundario

---

<http://aquatec.com.pa/2016/10/21/la-importancia-de-una-planta-de-tratamiento-de-agua-residual-hacia-el-ambiente/>>

<sup>39</sup> ROMERO ROJAS, JAIRÓ ALBERTO. Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería. 2002. Tercer Edición.

- Lechos de secados de lodos
- Los canales de aireación tienen profundidades entre 1.2 y 1.8 m o 3 a 3.6 m con paredes laterales de 45°
- Los aireadores pueden instalarse fijos o flotantes. Sobre uno o más sitios a lo largo del canal para suministrar suficiente velocidad dentro del zanjón
- Velocidad mayor a 0.30 m/s (para mantener el oxígeno disuelto requerido)
- Los cepillos operan a velocidades de 60 a 110 RPM con sumergencia de 5 a 30 cm
- Por seguridad se instalan dos aireadores
- Para el sedimentador secundario se utilizan cargas superficiales de diseño de 15 a 20 m/d para caudales promedios y de 40 a 80 m /d para caudales pico
- Profundidad de 3 a 4,2 m (sedimentador)
- El zanjón de oxidación adecuadamente diseñado provee remociones promedio de DBO mayores de 85% con aguas residuales municipales.
  
- **Ventajas del zanjón de oxidación.**
  - ✓ Nivel mayor de confiabilidad y desempeño debido a que el nivel constante de agua y la descarga continua reduce la tasa de rebose del vertedero y eliminan la sobrecarga periódica del efluente
  - ✓ El tiempo extendido de retención hidráulica y la mezcla completa minimizan el impacto de cargas contaminantes extremadamente altas o de sobre cargas hidráulicas
  - ✓ Produce menos lodos que otros sistemas biológicos debido a la extensa actividad biológica durante el proceso de lodos activados



- ✓ Reducción de consumo de electricidad.

#### **2.8.1.14.1 Aireación.**

“La aireación prolongada se enmarca dentro los procesos de fangos activos. En él, el agua residual, tras una etapa de pre-tratamiento (desbaste, desarenado y desengrasado) se introduce en una cuba de aireación o reactor biológico en el que se mantiene un cultivo bacteriano en suspensión - denominado licor mezcla- y formado por un gran número de microorganismos agrupados en flóculos o grumos.

En caso que la biomasa permanezca en el sistema por un periodo más largo, del orden de 18 a 30 días (de allí el nombre de aireación prolongada) recibiendo la misma carga de DBO del agua residual cruda que el sistema convencional, habrá menor disponibilidad de alimento de bacterias. La cantidad masa-de biomasa (kgSSVTA) es mayor que en el sistema de lodos activados convencional, el volumen del reactor aerobio es también más elevado, y el tiempo de retención del líquido oscila entre 16 y 24 horas, por lo tanto, hay menos materia orgánica por unidad de volumen del tanque de aireación y también por unidad de biomasa de reactor. Como consecuencia, las bacterias, para sobrevivir, pasan a utilizar de forma más intensa en sus procesos metabólicos la propia materia orgánica biodegradable componente de sus células. Esta materia orgánica celular es convertida en gas carbónico y agua a través de la respiración. Esto corresponde a una estabilización de la biomasa que ocurre en el propio tanque de aireación”<sup>40</sup>.

“Ya que no hay necesidad de estabilizar el lodo biológico de exceso, también se trata de evitar en el sistema de aireación prolongada la generación de alguna otra forma de lodo, que pueda requerir posterior estabilización. De este modo, los sistemas de aireación prolongada usualmente no poseen sedimentadores primarios, para evitar la necesidad de estabilizar el lodo primario. Con ello, obtienen una gran simplificación en el flujograma del proceso: no hay sedimentadores primarios ni unidades de digestión de lodo”<sup>41</sup>

“Una relación ampliamente utilizada por los diseñadores y operadores de plantas de tratamiento es la llamada carga de lodo, o relación A/M (alimento/microorganismo), o también F/M (food-to-microorganism ratio). Dicha relación se basa en el concepto

---

<sup>40</sup> SPERLING, MARCOS VON. Lodos Activados, principios del tratamiento biológico de aguas residuales. San Juan de Pasto. Universidad de Nariño. 2014. Primera Edición.

<sup>41</sup> SPERLING, MARCOS VON. Lodos Activados, principios del tratamiento biológico de aguas residuales. San Juan de Pasto. Universidad de Nariño. 2014. Primera Edición.

de que la cantidad de alimento o sustrato disponible por unidad de masa de los microorganismos está relacionada con la eficiencia del sistema. Así, se puede entender que, cuanto mayor sea la carga de DBO proporcionada a un valor unitario de biomasa (elevada relación A/M), menor será la eficiencia en la asimilación de este sustrato, pero, por otro lado, menor será también el volumen requerido para el reactor. Inversamente, cuanto menos DBO sea proporcionada a las bacterias (baja relación A/M), mayor será la avidez por el alimento, implicando una mayor eficiencia en la remoción de la DBO, junto con el requisito de un mayor volumen para el reactor. En la situación que la cantidad de alimento proporcionada es muy baja, entra a prevalecer el mecanismo de la respiración endógena, característico de los sistemas de aireación prolongada”<sup>42</sup>.

#### **2.6.1.14.2 Sedimentador.**

“Los sedimentadores son diseñados para remover la materia orgánica soluble y coloidal que permanece después del tratamiento primario. Se encuentran varios tipos de sedimentación como:”<sup>43</sup>

- **Sedimentación primaria:** para remover sólidos sedimentables y material flotante de aguas residuales crudas, reduciendo el contenido de sólidos suspendidos.
- **Sedimentación intermedia:** para remover sólidos y crecimientos biológicos preformados en reactores biológicos intermedios como los filtros percoladores de primera etapa.
- **Sedimentadores secundarios:** para remover la biomasa y sólidos suspendidos de reactores biológicos secundarios, como los procesos de lodos activados y los filtros percoladores.
- **Sedimentadores terciarios:** para remover sólidos suspendidos y floculados, o precipitados químicamente en plantas de tratamiento de aguas residuales.

#### **2.6.1.14.3 Criterios generales para el diseño de tanques de sedimentación.**

---

<sup>42</sup> SPERLING, MARCOS VON. Lodos Activados, principios del tratamiento biológico de aguas residuales. San Juan de Pasto. Universidad de Nariño. 2014. Primera Edición.

<sup>43</sup> ROMERO ROJAS, JAIRO ALBERTO. Potabilización del Agua. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería. 1999. Tercer Edición.

- Proveer adecuada y rápida recolección del lodo sedimentado, así como de la espuma.
- Minimizar las corrientes de salida, limitando las cargas de rebose sobre el vertedero. El efluente debe salir sin alterar el contenido del tanque.
- Proveer profundidad suficiente para almacenar lodo y permitir su espaciamiento adecuado.
- Borde libre mayor de 30 cm.
- Reducir efectos del viento mediante pantallas y vertederos.

#### **2.6.1.14.4 Tipos de tanques de sedimentación:**

- “Tanques de flujo horizontal: son rectangulares en planta, con el fondo inclinado hacia una tolva de extracción de lodos en el extremo de entrada.
- Tanques de flujo radial: son circulares en planta, con el fondo inclinado hacia un pozo central; el afluente ingresa por el centro, en un nivel inferior al del vertedero perimetral de salida, existiendo un flujo tanto radial como ascensional, de velocidad decreciente entre la entrada y la salida.
- Tanques de flujo ascensional: pueden ser cuadrados o circulares en planta, constituidos como una pirámide o invertido, con el fondo fuertemente hacia un pozo central; el afluente entra por el centro y fluye hacia abajo, para luego moverse radial y ascensionalmente hacia el vertedero de salida.”<sup>44</sup>
- Para el zanjón del laboratorio de hidráulica es de flujo radial.

---

<sup>44</sup> ROMERO ROJAS, JAIRO ALBERTO. Potabilización del Agua. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería. 1999. Tercer Edición.

#### **2.6.1.14.5 Tanque secundario de sedimentación.**

“El tanque secundario es importante debido a la carga grande de sólidos y a la naturaleza esponjosa del floculo biológico de los lodos activados. Los tanques de sedimentación secundaria son generalmente circulares, pero se han construido en formas rectangulares, cuadradas, hexagonales y octogonales. El mecanismo de remoción más utilizado es el de tipo cadena y paletas metálicas preferiblemente de plástico, el cual permite una remoción continúa de sólidos.”<sup>45</sup>

#### **2.6.1.14.6 Tipos de Lodos.**

Los lodos que se producen en los procesos de tratamiento de aguas son principalmente los siguientes:

- Lodo primario proveniente de la sedimentación de aguas residuales
- Lodo secundario proveniente del tratamiento biológico de aguas residuales
- Lodos digeridos provenientes de los dos anteriores, separados o mezclados
- Lodos provenientes de la coagulación y sedimentación de aguas
- Lodos provenientes de plantas de ablandamiento
- Lodos provenientes de desarenadores y rejillas

#### **2.6.1.14.7 Características de los Lodos.**

“Todos los lodos crudos tienen un contenido bajo de sólidos (1-6%); por ello, la disposición de su pequeño contenido de sólidos requiere el manejo de un gran volumen de lodo. El problema principal en el tratamiento de lodos radica, por tanto, en concentrar los sólidos mediante la máxima remoción posible de agua y en reducir su contenido orgánico.”<sup>46</sup>

---

<sup>45</sup> ROMERO ROJAS, JAIRO ALBERTO. Potabilización del Agua. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería. 1999. Tercer Edición.

<sup>46</sup> ROMERO ROJAS, JAIRO ALBERTO. Potabilización del Agua. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería. 1999. Tercer Edición.

“Los lodos derivados de aguas residuales están compuestos en especial por la materia orgánica removida del agua residual, la cual fortuitamente se descompone y causa los mismos efectos indeseables del agua residual cruda. Las características de los lodos varían mucho dependiendo de su origen, de su edad, del tipo de proceso del cual provienen y de la fuente original de los mismos. El volumen de lodo que se produce en un tanque de sedimentación debe conocerse o estimarse para cuantificar de diferentes componentes del sistema de tratamiento y disposición de lodos. Dicho volumen depende principalmente de las características del agua residual, del grado de tratamiento previo, del tiempo de sedimentación, de la densidad de sólidos, del contenido de humedad, del tipo de equipo o método de remoción de lodos y de la frecuencia de remoción de los mismos.”<sup>47</sup>

“La cantidad de lodo producido es muy variable, dependiendo del proceso de tratamiento usado y de la concentración de aguas residuales; en las siguientes tablas se resumen los valores típicos de las cantidades y características de los lodos producidos por diferentes procesos de tratamiento para aguas residuales y se describen los tipos de lodos que se obtendrán del sistema de tratamiento diseñado, respectivamente.”<sup>48</sup>

#### **2.6.1.14.8 Secado de Lodos**

“Mediante el secado de los lodos se consigue reducir el peso de los lodos, el secado se crea mediante la evaporación del agua que existe en los lodos. En la selección del método de secado de un lodo hay que tener en cuenta la naturaleza del lodo, los procesos subsecuentes de tratamiento y el método de disposición final.”<sup>49</sup>

### **2.7 Marco Conceptual**

#### **2.7.1 Aguas residuales (AR):**

---

<sup>47</sup> ROMERO ROJAS, JAIRO ALBERTO. Potabilización del Agua. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería. 1999. Tercer Edición.

<sup>48</sup> ROMERO ROJAS, JAIRO ALBERTO. Potabilización del Agua. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería. 1999. Tercer Edición.

<sup>49</sup> ROMERO ROJAS, JAIRO ALBERTO. Potabilización del Agua. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería. 1999. Tercer Edición.

“Las aguas residuales son el resultado del uso doméstico o industrial del agua, son llamadas también negras o cloacales. El agua usada constituye un residuo, algo que no sirve para el usuario directo; son negras por el color que habitualmente adquieren”<sup>50</sup>.

Las AR están compuestas por las aguas usadas y los sólidos que por uno u otro medio se introducen en las tuberías y son transportadas mediante los sistemas de alcantarillado.

Tabla 1. Parámetros para la caracterización de aguas residuales

PARÁMETRO	IMPORTANCIA EN AGUAS RESIDUALES
<b>Turbiedad</b>	Indica la calidad de las aguas vertidas o naturales en relación con la materia coloidal y residual en suspensión.
<b>Temperatura</b>	Influye tanto en el desarrollo de la vida acuática, como sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción.
<b>Color</b>	Indica la edad de las aguas residuales
<b>Olor</b>	Indica la descomposición de la MO y ayuda a evaluar la calidad del agua.
<b>Sólidos</b>	Su presencia afecta directamente la cantidad de lodo que se produce en el sistema de tratamiento. Los diferentes tipos de sólidos son los siguientes: sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), sólidos suspendidos (SS), sólidos suspendidos volátiles (SSV), sólidos disueltos (SD) y sólidos sedimentables (SSD).
<b>Oxígeno Disuelto</b>	Determina si los cambios biológicos en las AR son llevados a cabo por organismos aeróbicos o anaeróbicos. En uno de los ensayos más importantes para medir la calidad de una corriente de agua, además de ser básico en la determinación de la DBO.
<b>DBO</b>	Indica la cantidad de oxígeno, utilizado por los microorganismos en la estabilización de la MO biodegradable, bajo condiciones aeróbicas.
<b>DQO</b>	Determina el contenido de MO de las AR, oxidando casi completamente todos los compuestos orgánicos a CO <sub>2</sub> y agua.
<b>Nitrógeno</b>	Es necesario para evaluar la tratabilidad de las AR por tratamientos biológicos.

<sup>50</sup> SSPT WATER TECHNOLOGIES. ¿Que es el Agua Residual? [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 18 marzo, 2018]. Disponible en internet: <URL: <http://www.sstp.mx/que-es-el-agua-residual.html>>

<b>Fósforo</b>	Es de importancia secundaria en la mayor parte de las aguas residuales domésticas ARD, pero puede ser vital en residuos industriales y en lodos de AR.
<b>Acidez</b>	Condición del agua para disminuir el pH por debajo de 7. Es la capacidad cuantitativa de una solución acuosa para reaccionar con iones hidroxilo.
<b>Alcalinidad</b>	Indica la cantidad de cambio que ocurrirá en el pH con la adición de cantidades moderadas de ácido, y proporciona información sobre las relaciones de iones bicarbonato y carbonato y la evolución de la química del agua.
<b>Metales Pesados</b>	Son imprescindibles para el normal desarrollo de la vida biológica, en bajas concentraciones pueden perjudicar a los seres vivos y bioacumularse.

Fuente: METCALF & EDDY. Wastewater Engineering. Treatment and Reuse. 4 ed. Miami: McGraw Hill, 2004.

“La *Tabla 1* muestra la forma como se componen las AR, básicamente, 99,9% de agua en su estado conocido como de agua potable y 0,1% por peso de sólidos, sean éstos disueltos o suspendidos. Este 0,1% referido es el que requiere ser removido para que el agua pueda ser reutilizada o tratada.

La forma de expresar las características de un AR puede hacerse de muchas maneras, dependiendo de su propósito específico; sin embargo, vale la pena anotar que toda caracterización de AR implica un programa de muestreo apropiado para asegurar representatividad de la muestra y un análisis de laboratorio de conformidad con normas estándar que aseguren precisión y exactitud en los resultados. En general, un programa de muestreo para caracterización y control de calidad de aguas supone un análisis cuidadoso del tipo de muestras, número de ellas y parámetros que se deben analizar, en especial en un medio como el colombiano, en el que no se justifica asignar más recursos de los estrictamente necesarios para satisfacer el objetivo propuesto”<sup>51</sup>.

Tabla 2. Composición de aguas residuales.

<b>AGUA POTABLE</b>	<b>SÓLIDOS</b>	<b>GASES DISUELTOS</b>	<b>COMPONENTES BIOLÓGICOS</b>
	0.1 % (por peso)	-	-
	Suspendidos	O <sub>2</sub>	Bacterias

<sup>51</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES IDEAM. [citado 18 marzo, 2018]. Disponible en internet: <URL: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021318/03TextoCompleto.pdf>>

99.9 %	Disueltos	CO <sub>2</sub>	Micro y macroorganismos
	Coloidales	H <sub>2</sub> S	Virus
	Sedimentables	N <sub>2</sub>	-

Fuente: METCALF & EDDY. Wastewater Engineering. Treatment and Reuse. 4 ed. Miami: McGraw Hill, 2004.

## 2.8 Marco Legal.

Para el desarrollo del proyecto se tendrán en cuenta las siguientes normatividades:

- **“Constitución Política Nacional:** En los artículos 78, 79 y 80 establece que el Estado tiene, entre otros deberes, los de proteger la diversidad e integridad del ambiente; fomentar la educación ambiental; prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental; imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados al ambiente”<sup>52</sup>.
- **“Resolución 1096 de 2000, Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS, título E, tratamiento de aguas residuales:** El RAS es el documento técnico que fija los criterios básicos y requisitos mínimos que deben reunir los proyectos del sector de agua potable y saneamiento básico. En el caso de sistemas de tratamiento de aguas residuales, el RAS tiene en cuenta los procesos involucrados en la conceptualización, diseño, construcción, supervisión técnica, puesta en marcha, operación y mantenimiento”<sup>53</sup>.
- **“Resolución 0631 del 17 de Marzo de 2015:** Resolución por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los

<sup>52</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA. Plan nacional de manejo de aguas residuales municipales en Colombia [en línea]. Bogotá: El Ministerio[citado 25 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: [http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/PLAN\\_NACIONAL\\_DE\\_MANEJO\\_DE\\_AGUAS\\_RESIDUALES\\_MUNICIPALE\\_S\\_EN\\_COLOMBIA.pdf](http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/PLAN_NACIONAL_DE_MANEJO_DE_AGUAS_RESIDUALES_MUNICIPALE_S_EN_COLOMBIA.pdf)>

<sup>53</sup>COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA. Plan nacional de manejo de aguas residuales municipales en Colombia [en línea]. Bogotá: El Ministerio[citado 25 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: [http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/PLAN\\_NACIONAL\\_DE\\_MANEJO\\_DE\\_AGUAS\\_RESIDUALES\\_MUNICIPALE\\_S\\_EN\\_COLOMBIA.pdf](http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/PLAN_NACIONAL_DE_MANEJO_DE_AGUAS_RESIDUALES_MUNICIPALE_S_EN_COLOMBIA.pdf)>



vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”<sup>54</sup>.

## 2.9 Metodología.

Con este proyecto se plantea diseñar y construir un modelo de tratamiento de aguas residuales, con el cual se espera cumplir con todos los criterios de diseño y caracterización físico química del agua. Cabe resaltar que para llegar a esta finalidad se debe pasar por una serie de etapas y ensayos para determinar de una manera más precisa la efectividad y funcionamiento de este modelo.

Con este diseño se analiza el sistema o proceso a utilizar ya que hay diferentes métodos o procesos de hacerlo. Así mismo se implementan las siguientes etapas como lo son:

- **Etapa 1:** Diseño de las dimensiones acordes a cada parte del proceso del modelo siguiendo parámetros ya establecidos los cuales se evalúan con un caudal de diseño.
- **Etapa 2:** Se realizarán los planos digitales del modelo, según los resultados obtenidos en los cálculos obtenidos en la etapa 1.
- **Etapa 3:** Se llevará la construcción del modelo, con los planos correspondientes a la misma.
- **Etapa 4:** Se desarrollaran pruebas de laboratorio donde se determinará varias características del agua residual como lo son la turbiedad, test de jarras esperando que cumpla la normatividad vigente.

---

<sup>54</sup>COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Normatividad para el tratamiento de aguas residuales [en línea]. Bogotá: El Ministerio [citado 24 Abril, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.nyfdecolombia.com/normtividad-tratamiento-de-agua/pdf/agua-residual/Resolucion-0631-de-17-marzo-2015.pdf>>

- **Etapa 5:** Obtenidos los correspondientes resultados de laboratorio y construida la planta se harán pruebas a la planta modelo para garantizar su funcionamiento y eficiencia.
- **Etapa 6:** Se creará la guía de laboratorio de la planta modelo, para el aprovechamiento de los estudiantes y docentes en semestres años posteriores.

### **3. DISEÑO**

#### **3.1 Etapa 1.**

##### **3.1.1 Diseño Zanjón de Oxidación**

Tabla 3. Parámetros de Diseño para Zanjonos de Oxidación

Parámetro	Valor	Observaciones
Relación A/M, kg DBO/kg SSV.d	0,1 – 0,3	En la India <sup>(2)</sup>
	0,03 – 0,1 <sup>(1)</sup>	En Estados Unidos <sup>(31)</sup>
	0,05	En Europa <sup>(2)</sup>
Carga orgánica volumétrica, gDBO/m <sup>3</sup> .d	200 – 1.200	
	220	Para aguas residuales domésticas <sup>(1)</sup>
	160	Para aguas residuales débiles
	< 640	Para aguas residuales industriales
SSLM, mg/L	2.000 – 6.000	
	3.000 – 8.000 <sup>(1)</sup>	
Edad de lodos, d	20 – 30	
	> 15	Para temperatura > 15°C
Tiempo de aireación, h	12 – 36	
	24 - 72	En Inglaterra <sup>(31)</sup>
Relación de recirculación, %	25 - 75	
Profundidad, m	1,0 – 1,5	Para cepillos o rotores de jaula
	2,4 – 5,0	Para rotores mamut o cepillos de 1,07 m de diámetro
Sumergencia de los cepillos, cm	18	Para cepillos de 1,07 m de diámetro
	5 – 25	Para cepillos de 70 cm de diámetro
Longitud de los cepillos, m	0,3 – 4,5	En cepillos de 70 cm de diámetro <sup>(1)</sup>
	9 m	En cepillos de 107 cm de diámetro <sup>(1)</sup>
Velocidad de los cepillos, RPM	60 – 95	Para cepillos de 70 cm de diámetro <sup>(1)</sup>
	50 – 72	Para cepillos de 107 cm de diámetro <sup>(1)</sup>
Taludes	-	Preferiblemente en concreto, asfalto, arcilla o prefabricados para prevenir erosión.
Producción de lodos, g/cd	5 – 10	En la India <sup>(2)</sup>
	g/cd	25 – 30
	kg/kg DBOR	0,5 – 0,7
Oxígeno requerido, kg O <sub>2</sub> /kg DBOA	1,5 – 2,0	En la India <sup>(2)</sup>
	2,0	En Europa <sup>(2)</sup>
kg O <sub>2</sub> /kg DBOA	1,5 – 1,8	En Estados Unidos <sup>(31)</sup>
	kg O <sub>2</sub> /kg DBOR	0,3 – 0,8
Velocidad en la zanja, m/s	0,3 – 0,8	
Relación volumen zanjón/longitud de cepillo, m <sup>3</sup> /m	150 – 200	Para mantener velocidad de flujo adecuada con rotores de 70 cm <sup>(1)</sup>
	260	Para rotores de 107 cm <sup>(1)</sup>
Relación ancho del zanjón /longitud del cepillo	1,5 – 2,8 <sup>(1)</sup>	-
Remoción de DBO, %	> 90	
Remoción de SST, %	> 90	
Área de lechos de secado, m <sup>2</sup> /c	0,025	En la India <sup>(2)</sup>
	0,35	En Europa <sup>(2)</sup>
Área total requerida, m <sup>2</sup> /c	0,125	En la India <sup>(2)</sup>
	1,2	En Europa <sup>(2)</sup>
Calidad del efluente, mg/L	DBO < 15	
	SST < 15	
Carga superficial del sedimentador, m/d	NH <sub>3</sub> – N < 5	
	15 – 20	Para caudal promedio
	40 - 80	Para caudal máximo.

Fuente: ROMERO ROJAS, JAIRO ALBERTO. Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería. 2002. Tercer Edición.

Tabla 4. Criterios de Diseño para el Zanjón de Oxidación.

Zanjón de Oxidación		
Porción Recta del Canal	0,80	(m)
Profundidad	0,25	(m)
Radio Cono Grande	0,20	(m)
Volumen Cono Grande	0,0080	(m <sup>3</sup> )
Radio Cono Pequeño	0,070	(m)
Volumen Cono Pequeño	0,00040	(m <sup>3</sup> )

Caudal (Q)	0,2	L/s
	0,0002	m <sup>3</sup> /s
N (manning)	0,01	-
Velocidad (V)	0,003	m/s

Fuente: Autores.

Se supone un caudal de diseño de 0,2 L/s y una velocidad de 0,003 m/s.

Dónde:

- Volumen Cono Grande:

$$Vg = \frac{\pi \times \text{Radio Cono Grande}^2 \times \text{Radio Cono Grande}}{3}$$

$$Vg = \frac{\pi \times 0,20^2 \times 0,20}{3}$$

$$Vg = 0,008 \text{ m}^3$$

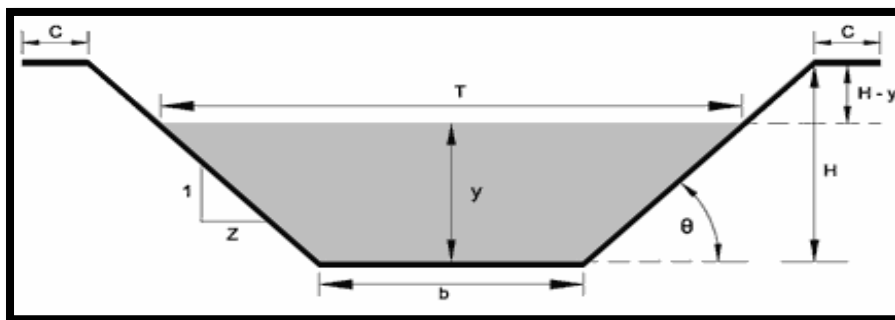
- Volumen Cono Pequeño:

$$Vg = \frac{\pi \times \text{Radio Cono Pequeño}^2 \times \text{Radio Cono Pequeño}}{3}$$

$$Vg = \frac{\pi \times 0,07^2 \times 0,07}{3}$$

$$Vg = 0,0004 \text{ m}^3$$

Figura 1. Elementos geométricos de la sección transversal del Zanjón.



Fuente: ROMERO ROJAS, JAIRO ALBERTO. Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería. 2002. Tercer Edición.

- $y$  = tirante de agua, altura que el agua adquiere en la sección transversal
- $b$  = base del canal o ancho
- $T$  = espejo de agua o superficie libre de agua
- $H$  = profundidad total del canal
- $H-y$  = borde libre
- $C$  = ancho de corona
- $\theta$  = ángulo de inclinación de las paredes laterales con la horizontal
- $Z : 1$

Para el cálculo de la profundidad ( $H$ ) del zanjón se obtuvo de la siguiente forma:

$$\text{Área} = \frac{\text{Caudal } (Q)}{\text{Velocidad } (V)}$$

$$\text{Área} = \frac{0,0002 \frac{m^3}{s}}{0,003 \frac{m}{s}}$$

$$\text{Área} = 0,07 \text{ m}^2$$

Entonces:

- Cálculo tirante de agua:

$$A = b \times y + z \times y^2$$

$$0,07 = 0,15 \times y + 0,5 \times y^2$$

$$0 = 0,5y^2 + 0,15y - 0,07$$

$$y = \frac{-0,15 \pm \sqrt{0,15^2 - 4 \times 0,5 \times (-0,07)}}{2 \times 0,5}$$

$$y = 0,2477 \text{ m} = \textit{profundidad}$$

- Cálculo perímetro mojado

$$p = b + 2y\sqrt{1 + z^2}$$

$$p = 0,15 + 2(0,2477)\sqrt{1 + 0,5^2}$$

$$p = 0,7568 \text{ m}$$

- Cálculo radio hidráulico

$$R = \frac{\textit{Área}}{\textit{perímetro mojado}}$$

$$R = \frac{0,07\text{m}}{0,7568\text{m}}$$

$$R = 0,088 \text{ m}$$

- Cálculo pendientes paredes zanjón

$$s = \frac{v \times n}{R^{\frac{2}{3}}}$$

$$s = \frac{0,03 \times 0,01}{0,088^{\frac{2}{3}}}$$

$$s = 0,000022964 \%$$

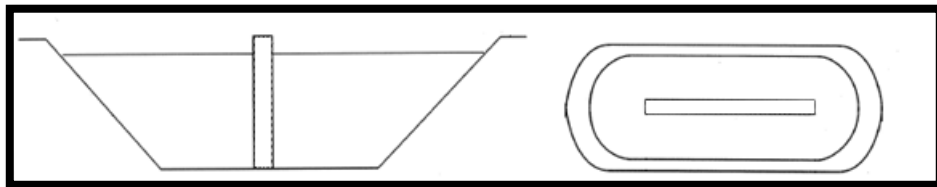
- Cálculo espejo de agua

$$T = b + 2zy$$

$$T = 0,15 + 2 \times 0,5 \times 0,2477$$

$$T = 0,3977 \text{ m}$$

Figura 2. Esquema Corte Transversal y Vista planta Zanjón.



Fuente: Autores.

- Longitud Total Zanjón (L):

$$L = \text{Porción Recta Canal} + (2 \times \text{Radio Cono Grande})$$

$$L = 0,80\text{m} + (2 \times 0,08)$$

$$L = 0,96 \text{ m}$$

- Volumen Porción Recta (Vr):

$$Vr = \frac{\text{Radio Cono Pequeño} + \text{Radio Cono Grande}}{2} \times \text{Profundidad} \\ \times \text{Porción Recta Canal} \times 2$$

$$Vr = \frac{0,07 + 0,2}{2} \times 0,25 \times 0,8 \times 2$$

$$\mathbf{Vr = 0,054 m^3}$$

- Volumen Tronco (Vt):

$$Vt = \frac{\text{Volumen Cono Grande}}{\text{Volumen Cono Pequeño}}$$

$$Vt = \frac{0,008}{0,0004}$$

$$\mathbf{Vt = 0,00798 m^3}$$

- Volumen Total Zanjón (Vt):

$$Vt = Vr + Vt$$

$$Vt = 0,054 + 0,00798$$

$$\mathbf{Vt = 0,06199 m^3}$$

Se supone una Población (P) de 100 estudiantes de ingeniería civil de la Universidad con una descarga la población de 10 L/c\*d.

- Caudal Aguas Residuales (Q):

$$Q = \frac{\text{Descarga Población}}{1000} \times P$$

$$Q = \frac{10}{1000} \times 100$$



$$Q = 1 \frac{m^3}{d}$$

- Tiempo Retención ( $\Theta$ ):

$$\theta = \frac{\text{Volumen Zanjón}}{\text{Caudal Aguas Residuales}}$$

$$\theta = \frac{0,06199}{1}$$

$$\theta = 0,062 \text{ días} \cong 1,49 \text{ horas}$$

- Producción de Lodos ( $P_x$ ):

$$P_x = \text{Producción de Lodos} \times (250 - \text{Concentración Efluente de DBO}) \\ \times \text{Caudal Agua Residual} \times 10^{-3}$$

$$P_x = 0,5 \times (250 - 2) \times 1 \times 10^{-3}$$

$$P_x = 0,12 \frac{Kg \text{ SS}}{d}$$

- Edad de Lodos ( $\Theta_c$ ):

$$\theta_c = \frac{\text{Concentración SSLM} \times \text{Volumen Zanjón} \times 10^{-3}}{\text{Producción de Lodos}}$$

$$\theta_c = \frac{2000 \times 0,06199 \times 10^{-3}}{0,12}$$

$$\theta_c = 1,0 \text{ días}$$

- Lodo Disponible por día ( $P_w$ ):

$P_w = \text{Producción de Lodos}$

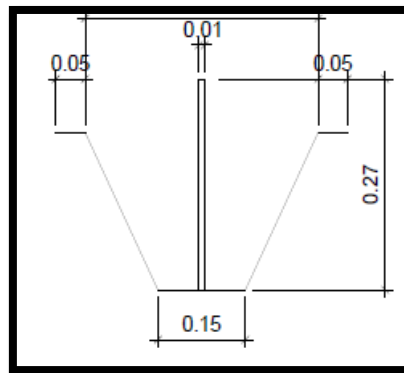
– (Concentración Efluente de DBO  $\times$  Caudal Aguas Residuales)  
 $\times 10^{-3}$

$$P_w = 0,12 - (2 \times 1) \times 10^{-3}$$

$$P_w = 0,12 \frac{\text{Kg SS}}{d}$$

### 3.1.2 Diseño Sedimentador

Figura 3. Esquema Corte Transversal Sedimentador.



Fuente: Autores.

- Área Superficial ( $A_s$ ):

$$A_s = \frac{\text{Caudal de Diseño} \times 3}{0,02}$$

$$A_s = \frac{0,0002 \times 3}{0,02}$$

$$A_s = 0,03 \text{ m}^2$$

- Diámetro Tanque ( $\emptyset$ ):

$$\emptyset = \sqrt{\frac{4 \times \text{Área Superficial}}{\pi}}$$

$$\emptyset = \sqrt{\frac{4 \times 0,03}{\pi}}$$

$$\emptyset = \mathbf{0,20\ m}$$

- Volumen Tanque (V):

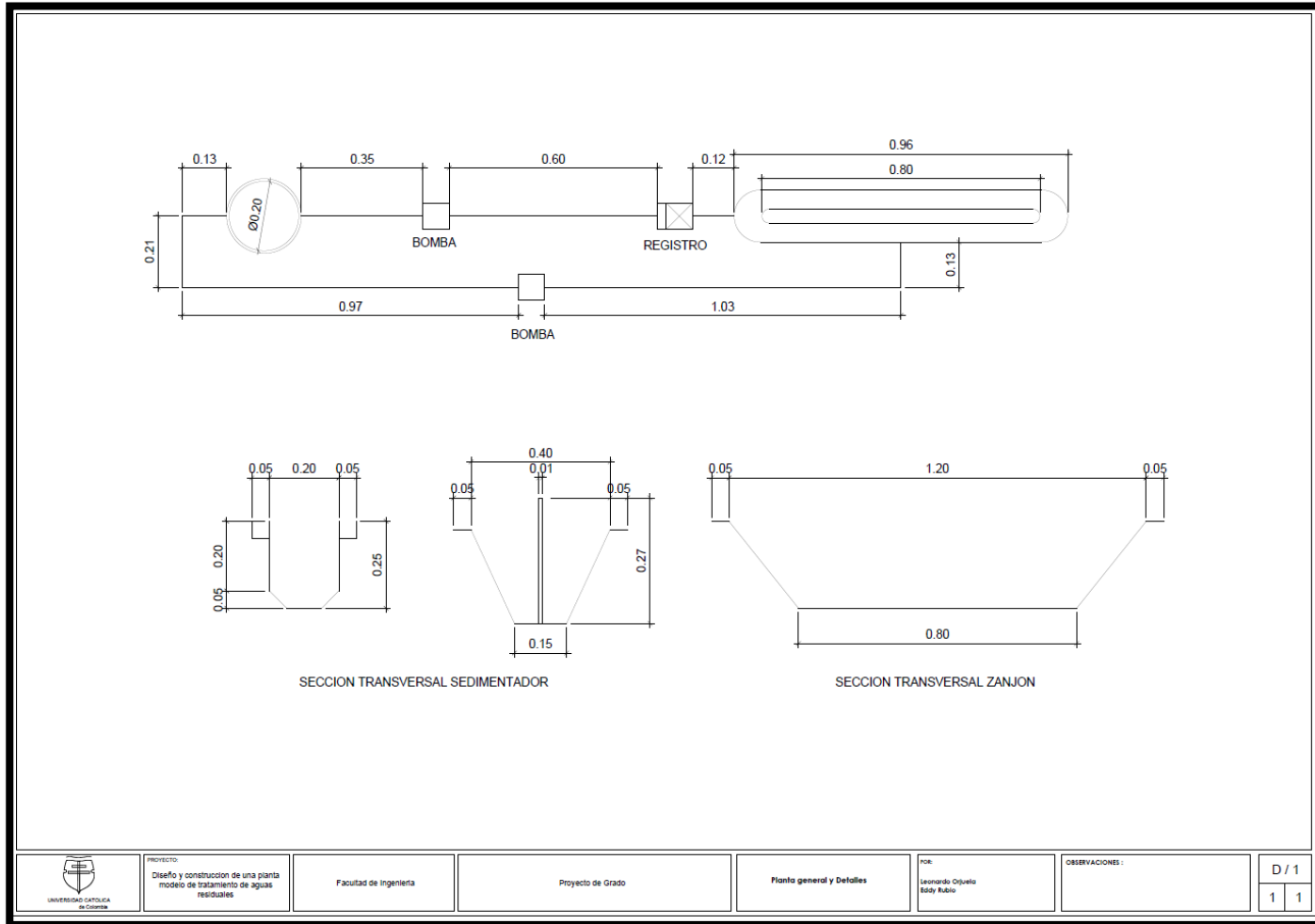
$$V = \pi \times \emptyset^2 \times \text{Altura Tanque}$$

$$V = \pi \times 0,2^2 \times 0,25$$

$$V = \mathbf{0,03\ m^3}$$

Nota: Respecto al análisis hidráulico de las tuberías no se tienen en cuenta las pérdidas ya que son mínimas debido al poco trayecto que tiene y la impulsión de la bomba cumple con la altura necesaria para el funcionamiento del sistema, la capacidad máxima de las bombas es de 2 mCa y la altura máxima del sistema es de 30 cm.

### 3.2 Etapa 2. Plano Zanjón de Oxidación.



Fuente: Autores.

### 3.3 Etapa 3. Instalaciones y Equipo Requerido

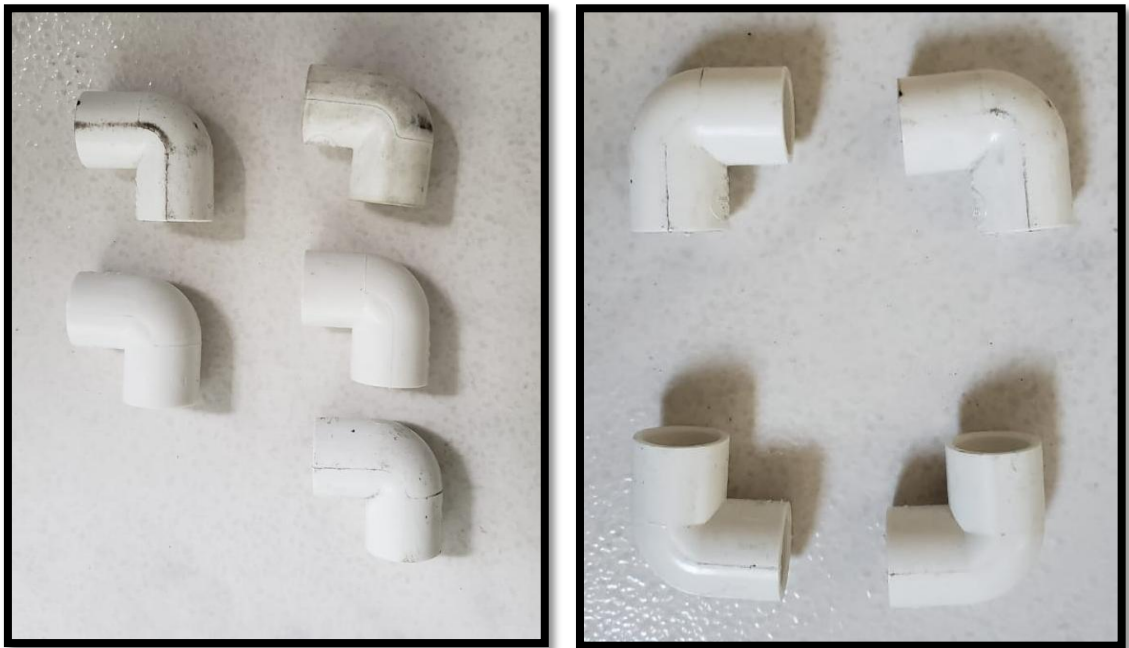
#### 3.3.1 Instalaciones

Se requerirá el laboratorio de hidráulica de la facultad de ingeniería civil.

#### 3.3.2 Equipo

Las herramientas y materiales requeridos para la elaboración de la planta modelo son:

Figura 4. Codos PVC a 90° para tubería de 1/2”.



Fuente. Autores.

Figura 5. Tubería PVC de 3/8”.



Fuente. Autores.

Figura 6. Uniones de PVC para tubería de 1/2”.



Fuente. Autores.

Figura 7. Registros de paso tipo Bola para tubería de 1/2”.



Fuente. Autores.

Figura 8. Alicates.



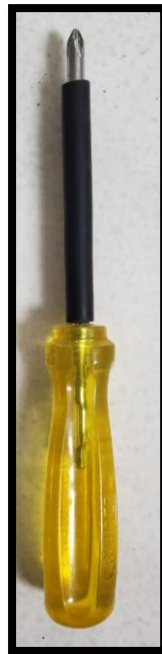
Fuente. Autores.

Figura 9. Taladro.



Fuente. Autores.

.Figura 10. Destornillador Punta de Estrella.



Fuente. Autores.



Figura 11. Sika Flex 221 color Blanco.



Fuente. Autores.

Figura 12. Manguera plástica transparente de 1/2”.



Fuente. Autores.

Figura 13. Abrazadera metálica para manguera plástica.



Fuente. Autores.

Figura 14. Acople metálico de 1/2”.



Fuente. Autores.

Figura 15. Resumen de Materiales.



Fuente. Autores.

Figura 16. Tanque Recolector de Aguas Residuales.



Fuente. Autores.

Figura 17. Zanjón de Oxidación.



Fuente. Autores.

Figura 18. Bomba de Agua.



Fuente. Autores.

Figura 19. Sedimentador de Flujo Circular.



Fuente. Autores.

### 3.3.3 Proceso de Construcción

1. Inicialmente se instaló la válvula que permite la salida del agua residual hacia la estructura del zanjón de oxidación.

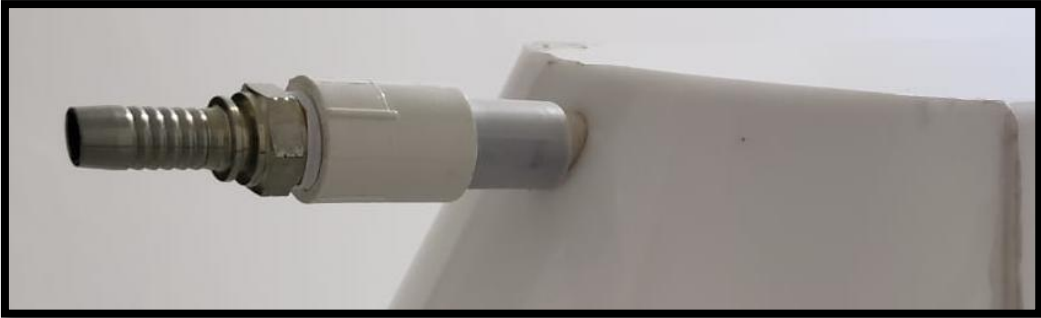
Figura 20. Tanque Salida de Agua Residual.



Fuente. Autores.

2. Union de la salida de y entrada del zanjon por medio de tubería de PVC

Figura 21. Succión y entrada del zanjón.



Fuente. Autores.

3. Entrada y salida de al sedimentador

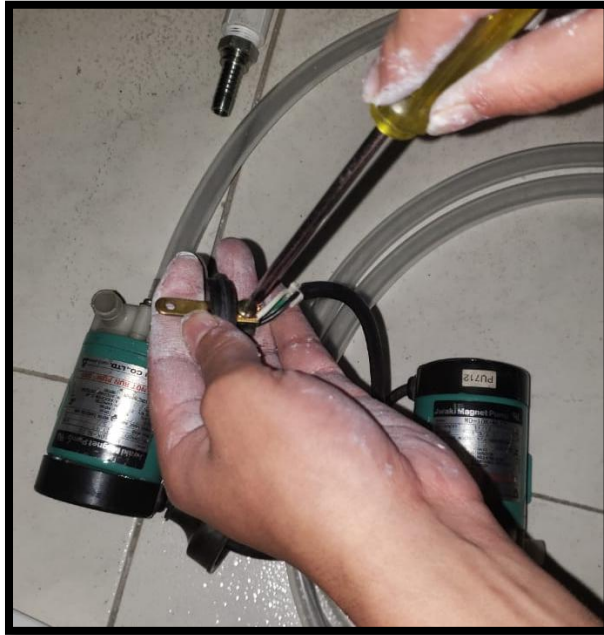
Figura 22. Entrada y salida del sedimentador.



Fuente. Autores.

#### 4. Montaje y funcionamiento de bombas de agua.

Figura 23. Ensamble de Bombas.



Fuente. Autores.



5. Pegue de accesorios con tubería.

Figura 24. Construcción tubería.



Fuente. Autores.

6. Construcción estructura del sedimentador.

Figura 25. Construcción Estructura Sedimentador.



Fuente. Autores.

## 7. Estructura de retorno al Zanjón de Oxidación

Figura 26. Retorno de Agua Tratada.



Fuente. Autores.

## 8. Preliminar PTAR Zanjón de Oxidación

Figura 27. Montaje Preliminar.



Fuente. Autores.

## 9. Llenado de Agua residual

Figura 28. Agua Residual



Fuente. Autores.

10. Paso hacia el zanjón de oxidación

Figura 29. Zanjón en funcionamiento.



Fuente. Autores.

## 11. Paso hacia el zanjón de oxidación

Figura 30. Sedimentador en funcionamiento.



Fuente. Autores.

### 3.4 Etapa 4. Ensayos de Laboratorio.

A continuación se presentan los ensayos de laboratorio realizados donde es importante aclarar que el agua utilizada fue titulada en el laboratorio por los autores del presente trabajo de grado y por este motivo no se obtendrá un valor de DBO, DQO y SSVLM estimado.

#### 3.4.1 Dureza del Agua.

La determinación de la dureza del agua es útil como una medida analítica de la calidad del agua. La dureza es de particular interés en procesos industriales debido a que el calentamiento del agua dura causa la precipitación del carbonato cálcico, que luego obstruirá calderas y tuberías.

Una consecuencia de la dureza del agua se refleja de manera crítica en la industria en la formación de incrustaciones y sedimentos en unidades tales como calentadores y caldera, los cuales se ven sometidos a aumentos variables de temperatura. Los iones responsables de esta dureza son primordialmente el  $\text{Ca}^{++}$  y el  $\text{Mg}^{++}$  y las aguas que los contienen se denominan aguas duras. De acuerdo a la dureza podemos clasificarlas como:

Tabla 5. Clasificación de Dureza del Agua.

Denominación	ppm $\text{CaCO}_3$
Muy suaves	0 a 15
Suaves	16 a 75
Medias	76 a 150
Duras	151 a 300
Muy duras	Más de 300

Fuente: Autores

La dureza a su vez puede ser clasificada en los siguientes términos:

- Dureza total: provenientes de las sales de calcio y magnesio presentes en el agua.
- Dureza cálcica: Provocada por la presencia del ión calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ). Dureza magnésica: provocada por la presencia de los

iones magnesio (Mg<sup>++</sup>).

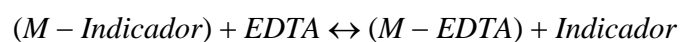
- Dureza carbonática: La presenta bajo la forma de carbonatos y bicarbonatos.
- Dureza permanente o no carbonática: la presente bajo la forma de cloruros, sulfatos y nitratos.

- **Reacciones Involucradas.**

- Dureza Total

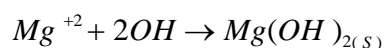
Rojo o rosado    incoloro    azul

- Dureza Cálctica



Rojo o rosado    incoloro                          violáceo

- Precipitación de los iones de magnesio



- **Datos Obtenidos.**

A continuación se presentan los datos recopilados durante el desarrollo del ensayo:

Tabla 6. Volúmenes de EDTA empleado en la titulación para la determinación de la dureza total de la muestra de agua.

Ensayo	Volumen de EDTA ( $V_{\text{EDTA}} \pm 0,05$ )mL
1	1,60

Fuente: Autores



Tabla 7. Volúmenes de EDTA empleado en la titulación para la determinación de la dureza cálcica de la muestra de agua

Ensayo	Volumen de EDTA ( $V_{EDTA} \pm 0,05$ )mL
2	1,30

Fuente: Autores.

Tabla 8. Concentración de las sustancias empleadas

Concentración del EDTA ( $C_{EDTA} \pm 0,0002$ )M	Concentración del NaOH ( $C_{NaOH}$ )M
0,017	1

Fuente: Autores.

### - Resultados.

Tabla 9. Resultados pertinentes al estudio estadístico del volumen de EDTA empleado para determinar la dureza total de la muestra.

Media Aritmética ( $\bar{X}$ )	3,66 mL
Desviación Estándar ( $\delta$ )	0,05 mL
Desviación Estándar Relativa ( $\delta_{RELATIVA}$ )	1,36%
Límite de Confianza (L.C.)	3,61mL - 3,71mL <sub>f</sub>

Fuente: Autores.

Tabla 10. Resultados pertinentes al estudio estadístico del volumen de EDTA empleado para determinar la dureza cálcica de la muestra.

Media Aritmética ( $\bar{X}$ )	2,09 mL
Desviación Estándar ( $\delta$ )	0,04 mL
Desviación Estándar Relativa ( $\delta_{RELATIVA}$ )	1,91%
Límite de Confianza (L.C.)	2,05mL - 2,13 mL <sub>f</sub>

Fuente: Autores.

Tabla 11. Resultados de la Dureza de Agua obtenidos

Dureza Total	(122,34 ± 2,22) mg CaCO <sub>3</sub> /L H <sub>2</sub> O
Dureza Cálcica	(69,86 ± 1,57) mg CaCO <sub>3</sub> /L H <sub>2</sub> O
Dureza Magnésica	(52,48 ± 1,57) mg CaCO <sub>3</sub> /L H <sub>2</sub> O

Fuente: Autores.

Los resultados de volumen necesarios en cada titulación (Tabla 5 y 6) corresponden a la teoría que predice que se necesita más volumen de EDTA en la determinación de la dureza total que en la determinación de la dureza cálcica.

La muestra de agua analizada se clasifica, en términos de su dureza, como poco dura o media.

### 3.4.2 Sólidos Totales.

Antes que nada se debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

Tabla 12. Parámetros para el ensayo de Sólidos Totales.

VARIABLES	SECADO	CALCINADO	SEDIMENTACIÓN
Temperatura	92 °C	300 °C	-
Tiempo	25 min	15 min	60 min
Volumen Muestra	1000 mL	(fijos y volátiles)	(suspendidos y disueltos)

Fuente: Autores.

Por consiguiente:

Tabla 13. Datos de Entrada para el ensayo de Sólidos Totales.

PESOS	PAPEL FILTRO	CÁPSULA PORCELANA	DESCRIPCIÓN
	(g)	(g)	
1	0,427	64,697	Filtro y porcelana con humedad
2	0,414	64,687	Filtro y porcelana sin humedad
3	0,588	64,763	Filtro y porcelana con solidos
4	0,492	64,762	Muestra calcinada a 300°C

Fuente: Autores.

Entonces se obtiene:

Tabla 14. Resultados obtenidos para el ensayo de Sólidos Totales

DATOS	RESULTADO	MEDIDA	DESCRIPCIÓN
peso del solido	0,161	(g)	Sólido
peso R + C	64763	(g)	Residuo + Capsula
peso C	64697	(g)	Peso Capsula
solidos totales	66	(mg/lt)	(Peso del residuo/mL de muestra)
solidos volátiles	1	(mg/lt)	Solidos Calcinados
solidos fijos	66	(mg/lt)	Solidos No Calcinados
solidos suspendidos	96	(mg/lt)	Sólidos en Filtro
solidos suspendidos volátiles	96	(mg/lt)	Solidos Calcinados que Quedan
solidos sedimentables	95	(mg/lt)	Solidos que quedan de 1000 mL

Fuente: Autores.

Tabla 15. Rango de calidad de aguas de acuerdo con el Índice General de Contaminación

CALIDAD	RANGO
Excelente	91-100
Buena	51-70
Regular	26-50
Pésima	0-25

Fuente: Instituto Colombiano Agropecuario.

Según “Tabla 13. Rango de calidad de aguas de acuerdo con el Índice General de Contaminación” y los resultados obtenidos se concluye que el agua en cuanto a solidos totales es un agua buena, en cuanto a solidos volátiles es pésima, en cuanto a solidos fijos es buena, en cuanto a solidos suspendidos es excelente, en cuanto a solidos suspendidos volátiles es excelente y en cuanto a solidos sedimentables es excelente

### 3.4.3 Test de Jarras

El objetivo del ensayo de Test de Jarras consiste en la simulación en vasos de precipitado el proceso de coagulación-floculación que se producirá en la planta de tratamiento y evaluar distintos parámetros durante o al final de los ensayos para caracterizar su funcionamiento.

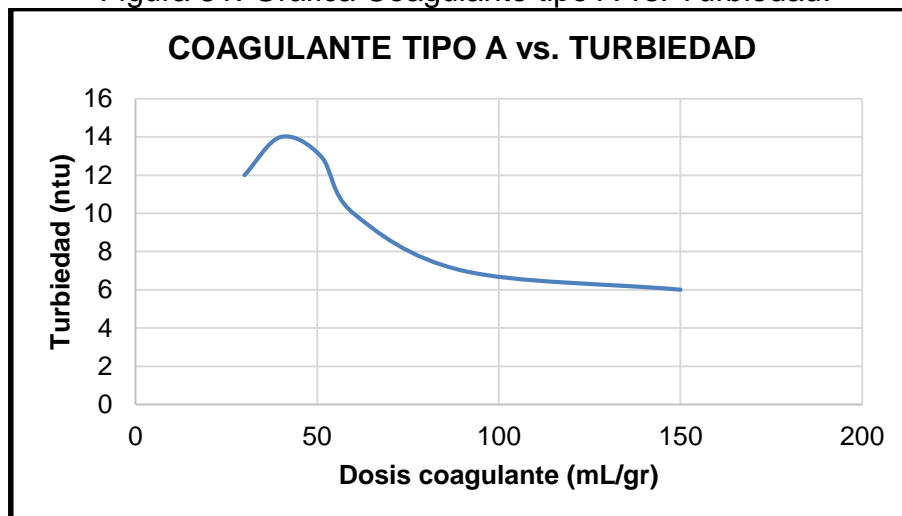
Para esta práctica de laboratorio se utilizaron dos tipos de coagulante los cuales fueron sulfato de aluminio tipo A y sulfato de aluminio tipo B en donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 16.Resultado Coagulante Tipo A vs. Turbiedad

Tipo A	
Coagulante	Turbiedad
30	12
40	14
51	13
60	10
90	7
150	6

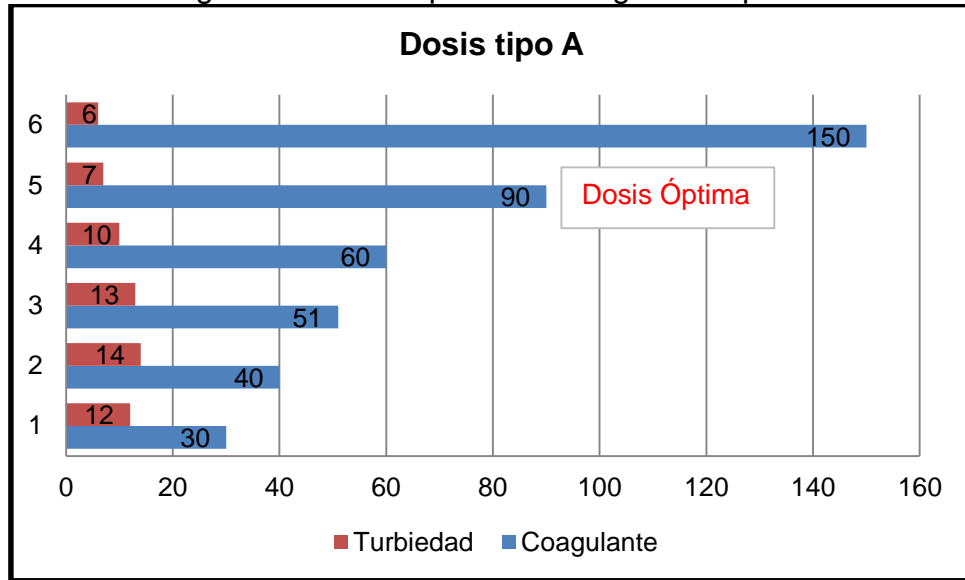
Fuente: Autores.

Figura 31. Gráfica Coagulante tipo A vs. Turbiedad.



Fuente: Autores.

Figura 32. Dosis óptima de coagulante tipo A.



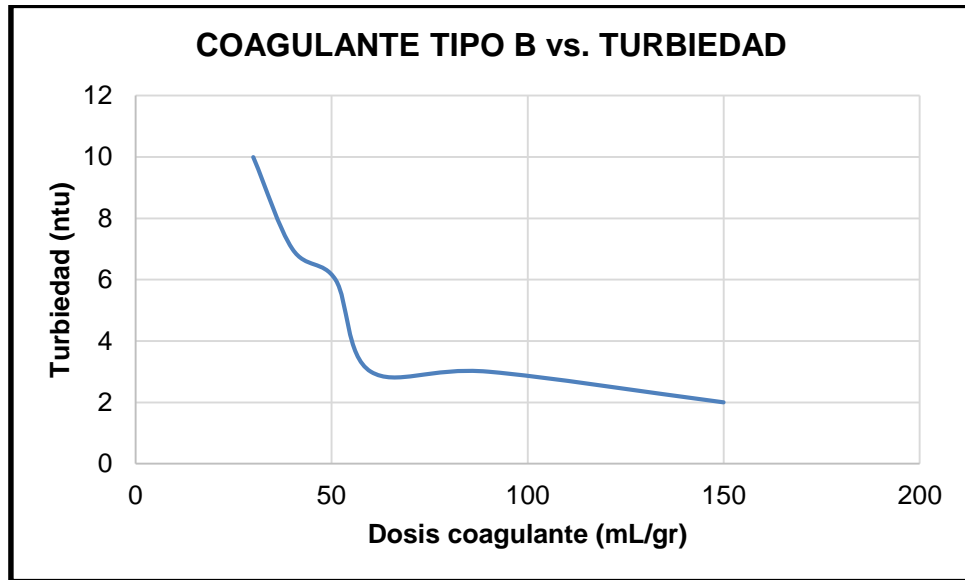
Fuente: Autores.

Tabla 17. Resultado Coagulante Tipo B vs. Turbiedad

Tipo B	
Coagulante	Turbiedad
30	10
40	7
51	6
60	3
90	3
150	2

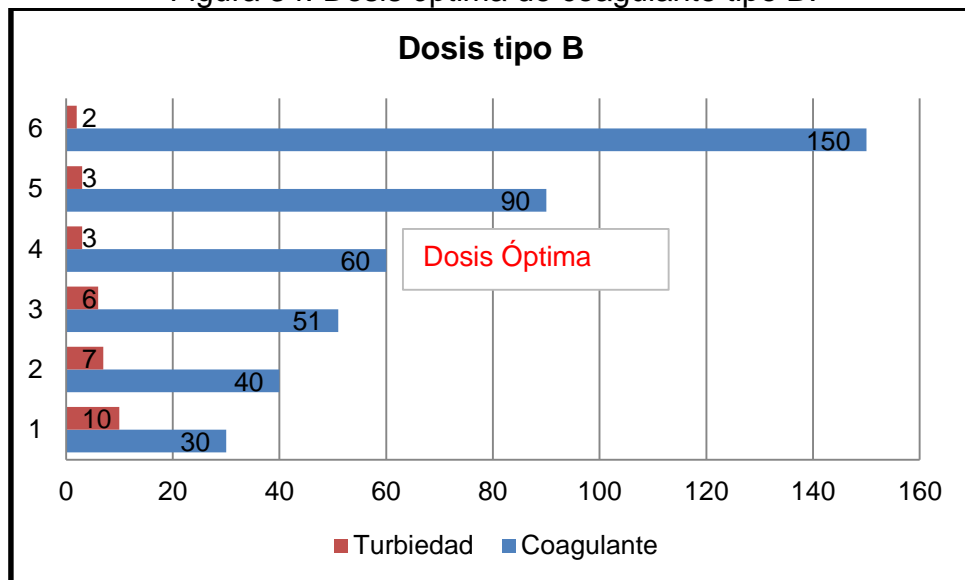
Fuente: Autores.

Figura 33. Gráfica Coagulante tipo B vs. Turbiedad.



Fuente: Autores.

Figura 34. Dosis óptima de coagulante tipo B.



Fuente: Autores.

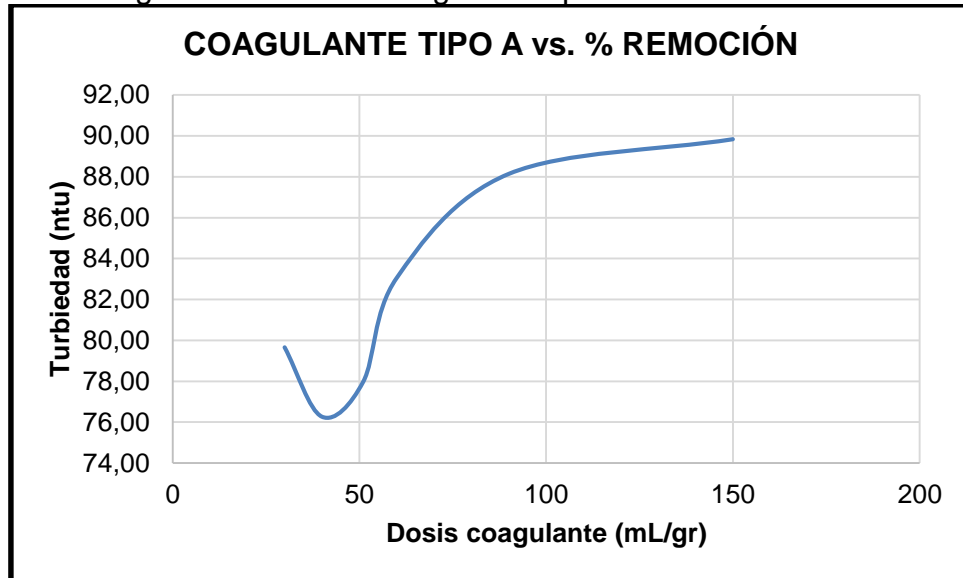
A continuación se presenta los porcentajes de remoción obtenidos:

Tabla 18. Resultado Coagulante Tipo A vs. % Remoción.

Tipo A	
Coagulante	% Remoción
30	79,66
40	76,27
51	77,97
60	83,05
90	88,14
150	89,83

Fuente: Autores.

Figura 35. Gráfica Coagulante tipo A vs. % Remoción.



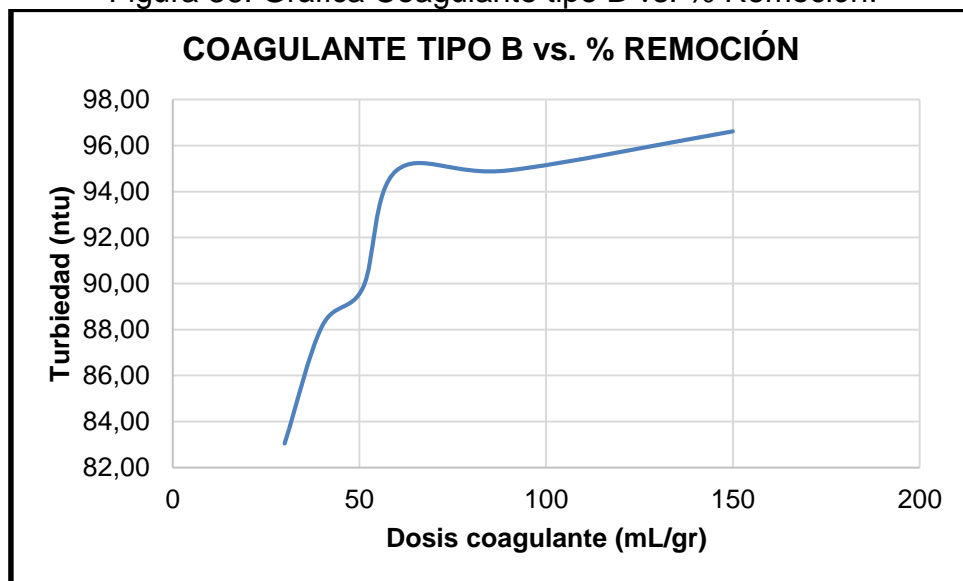
Fuente: Autores.

Tabla 19. Resultado Coagulante Tipo B vs. % Remoción.

Tipo B	
Coagulante	% Remoción
30	83,05
40	88,14
51	89,83
60	94,92
90	94,92
150	96,61

Fuente: Autores.

Figura 36. Gráfica Coagulante tipo B vs. % Remoción.



Fuente: Autores.



Figura 37. Test de Jarras.



Fuente: Autores.

Tabla 20. Tabla de resultados tipo A.

Valores Finales dosis tipo A		
Parámetro	Unidad	Valor
pH	7,76	-
Turbiedad	7	NTU
Conductividad	88,5	microsims/s
Color verdadero	32	Unidades platino
Resistividad	11,27	Kiloomios/cm
Temperatura	18,2	°Celsius
Salinidad	0	-
solidos	47,2	Mlg/L

Fuente: Autores.

Tabla 21. Tabla de resultados tipo B.

Valores Finales dosis tipo B		
Parámetro	Unidad	Valor
pH	7,51	-
Turbiedad	3	NTU
Conductividad	86,5	microsims/s
Color verdadero	19	Unidades platino
Resistividad	11,51	Kiloomios/cm
Temperatura	16,1	°Celsius
Salinidad	0	-
solidos	46,1	Mlg/L

Fuente: Autores.

### 3.5 Etapa 5

Una vez construida la planta modelo se realizó el ensayo de turbiedad del agua titulada obteniendo los siguientes resultados:

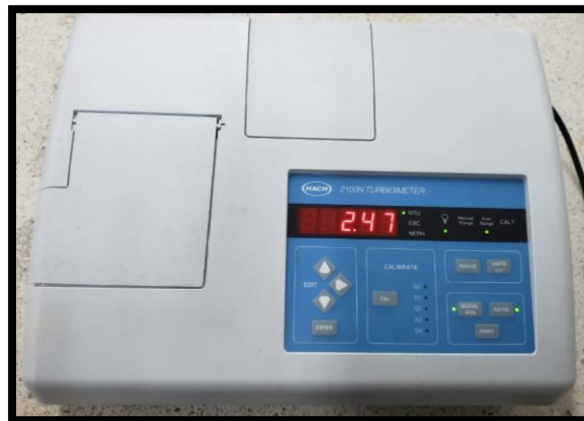
La turbidez es la dificultad del agua, para transmitir la luz debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos, que se presentan principalmente en aguas superficiales. Son difíciles de decantar y filtrar, y pueden dar lugar a la formación de depósitos en las conducciones de agua, equipos de proceso, etc. Además interfiere con la mayoría de procesos a que se pueda destinar el agua. La turbidez nos da una noción de la apariencia del agua y sirve para tener una idea acerca de la eficiencia de su tratamiento.

Figura 38. Lectura inicial turbidez (Aparato fotómetro).



Fuente: Autores.

Figura 39. Lectura final turbidez (Aparato fotómetro).



Fuente: Autores.

Tabla 22. Resultados agua al pasar por el sistema

	Agua Inicial	Agua Final	Diferencia	% Eficiencia
Turbidez	48,6	2,47	46,13	94,92
Unidad	NTU	NTU	NTU	%

Fuente: Autores.

Se utilizó la dosis tipo B como coagulante debido a los resultados obtenidos previamente ya que como se evidencio, se tenía un mejor resultado con este tipo de coagulante.

Se evidencia que el sistema es eficiente en un 94,92 % siempre y cuando se utilicen 30 g / l de la dosis tipo b de coagulante.

### 3.5.1 Aireación del sistema.

Tabla 23. Especificación Técnica Bomba de Aireación.

Especificación Bomba de Aireación		
Cantidad	1	-
Modelo	U-3800	-
Poder	2,2	Watts
Presión	0,01	Mpa
Salida	4	L/min
Largo	121	mm
Ancho	67	mm
Alto	51	mm

Fuente: Autores.

Figura 40. Bomba de Aireación.



Fuente: Autores.

## 3.6 Etapa 6

### 3.6.1 Manual de Operación y Mantenimiento.

La planta de tratamiento de aguas residuales de la universidad por medio de zanjón de oxidación podrá cumplir su objetivo si se opera de forma adecuada y se establece un cronograma de mantenimiento. El objetivo del presente manual es garantizar el buen uso de la planta.

#### - **Unidades del Sistema.**

Este está compuesto por los siguientes:

- Tanque de almacenamiento de Aguas Residuales.
- Zanjón de oxidación.
- Sedimentador.

#### - **Operación y Mantenimiento.**

- Verificar que el tanque de almacenamiento de Aguas Residuales este al 75 % de su capacidad.
- Realizar limpieza de bombas por lo menos una vez al mes.
- Hacer inspección de la tubería.
- Se recomienda realizar pruebas con agua limpia para el lavado de la tubería y demás accesorios incluidos.
- Por ensayo se debe vaciar la cámara de lodos, al final del sedimentador.
- Inspección visual a las unidades anteriormente mencionadas ya que material es acrílico y puede llegar a ser delicado.
- No apoyar ningún elemento sobre la estructura.

La operación de las bombas se realiza de forma manual, está compuesta por dos sistemas de paso de energía mediante un suiche.

Los registros de bola que tiene el sistema son operados de forma manual.

Es de vital importancia que los aireadores inicien su funcionamiento tan pronto la lámina de agua cubra su superficie de contacto, estos, se operan de manera manual.

En las prácticas se debe tener acceso a un cronometro digital para establecer los tiempos de retención en el zanjón de oxidación de 110 minutos y sedimentador con un tiempo de llenado aproximadamente de 3 minutos, así mismo para el tiempo de retorno se deberá cerrar la válvula de salida y abrir la válvula de retorno cuando esta haya cumplido el 75% del volumen de agua tratada para que el 25 % del sistema pueda retornar.

No dejar las bombas en funcionamiento si no se cuenta con agua que este en el sistema.

La remoción de los lodos se hace de forma manual y se deben depositar en un sitio especial para el tratamiento de ellos con previa autorización del docente asesor.

Figura 41. Sistema en operación.



Fuente: Autores.

Figura 42. Sedimentación de lodos en la cámara de rebose del sedimentador.



Fuente: Autores.

## 4. CONCLUSIONES

- Con este diseño de planta modelo de aguas residuales se pretende que los futuros estudiantes de la Universidad Católica de Colombia de la facultad de ingeniería civil tengan una estructura en la cual se pueda apreciar de manera detallada el funcionamiento de una planta de aguas residuales y como este a su vez puede beneficiar a la comunidad universitaria y así contribuir con el bienestar de todos.
- El montaje de la planta modelo fue exitoso, el agua titulada con sus partículas floculantes generadas sedimentaron de la mejor manera y gran parte de material contaminante quedo en la estructura del zanjón.
- A gran escala, y en un sistema de tratamiento de aguas residuales por zanjón de oxidación ofrece excelentes beneficios en cuanto a economía debido a su poco uso de energía contribuyendo al saneamiento de comunidades del país y al tratar de mantener los recursos hídricos del país.
- Con la prueba de jarras se determinó que las dosis utilizadas tipo A y tipo B redujeron drásticamente la turbiedad de la muestra con bentonita, pero la dosis tipo B presento la mejor relación costo turbiedad ya que al usar menos cantidad de dosis (60 ml) tuvo una mejor turbiedad (3) por tal motivo para las pruebas al zanjón en su etapa 5 se utilizó como coagulante tipo B para llegar al resultado exitoso de turbidez.
- El zanjón de oxidación cuenta con una bomba de aireación cuya principal función es mantener niveles óptimos de oxígeno necesario en nivel de vida estable a las bacterias presentes en el agua la cuales se encargan de degradar la materia orgánica y como consecuencia disminuir los grados de contaminación de ellas.
- El tanque de sedimentación de la planta de tratamiento es de sección circular y funciona mediante rebose, en donde la entrada del agua proveniente del zanjón de oxidación es por medio de una estructura tipo sombrilla cuya principal función es disminuir la fuerza de entrada al sedimentador así evitando la alteración de los flocs permitiendo una buena sedimentación.

- La planta cuenta con un sistema de recirculación, en la salida del sedimentador cuya relación es de 75 %, dirigido hacia el zanjón de oxidación, para obtener mejores resultados al momento de analizar el agua resultante después del proceso.
- El modelo está compuesto por tres estructuras, tanque de almacenamiento, zanjón de oxidación y sedimentador, estos están contemplados en una fase inicial. Para una posible segunda fase se debe implementar al sistema un tratamiento de lodos por medio de lechos de secado ya que por este medio se consigue una reducción en volumen y peso; además que requiere poco gasto de energía.
- Para optimización de resultados se debe implementar un mecanismo de filtración del agua saliente del sistema.
- El manual de operación y mantenimiento de la planta modelo, es una herramienta indispensable al momento en que algún actor de la comunidad universitaria desee utilizarla y se garantizará un buen funcionamiento de cada una de las estructuras que lo conforman.



## 5. RECOMENDACIONES

- En una segunda fase de la planta modelo es necesario incluir estructuras tales como filtración y lecho de secados, para una mejor apreciación de la funcionalidad de la planta, siendo así, se crea la apertura a nuevos trabajos de grado e investigaciones futuras donde se pueden proponer las estructuras anteriormente mencionadas.
- Se sugiere habilitar un área más grande en el laboratorio D de la universidad, ya que puede llegar a ser incomodo tanto la operación como el mantenimiento de la misma, por sus accesorios en donde fuertes movimientos o cargas mayoradas sobre las estructuras pueden llegar a dañarlo.
- Este modelo está diseñado para para aguas residuales presentes en el laboratorio de aguas de la universidad. Por ningún motivo debe ser usada con aguas de residuos industriales o con presencia de sobre tamaños en el agua problema.
- Con un correcto uso del manual de operación y mantenimiento se garantizara el buen funcionamiento y permanencia de la planta a través del tiempo.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

1. AQUATEC WATER TECHNOLOGIES. La importancia de una planta de tratamiento de agua residual hacia el ambiente [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 18 marzo, 2018]. Disponible en internet: <URL: <http://aquatec.com.pa/2016/10/21/la-importancia-de-una-planta-de-tratamiento-de-agua-residual-hacia-el-ambiente/>>
2. CHING, K. F. y HONG, Nelson. Design and Operation of MBR Type Sewage Treatment Plant at Lo Wu Correctional Institution, Hong Kong [en línea]. Hong Kong: Drainage Services Department (DSD) [citado 15 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: [https://www.dsd.gov.hk/EN/Files/Technical\\_Manual/technical\\_papers/ST11301.pdf](https://www.dsd.gov.hk/EN/Files/Technical_Manual/technical_papers/ST11301.pdf)>
3. COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA. Plan nacional de manejo de aguas residuales municipales en Colombia [en línea]. Bogotá: El Ministerio [citado 25 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: [http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/PLAN\\_NACIONAL\\_DE\\_MANEJO\\_DE\\_AGUA\\_S\\_RESIDUALES\\_MUNICIPALES\\_EN\\_COLOMBIA.pdf](http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/PLAN_NACIONAL_DE_MANEJO_DE_AGUA_S_RESIDUALES_MUNICIPALES_EN_COLOMBIA.pdf)>
4. COLOMBIA. MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. Tratamiento De Aguas Residuales, Título E. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento basico RAS. Bogotá: Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2000.
5. COLOMBIA. MINISTERIO DE EDUCACIÓN. La Udca cuenta con planta de tratamiento terciaria de aguas residuales [en línea]. Bogotá: El Ministerio [citado 17 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.mineducacion.gov.co/cvn/1665/w3-article-328613.html>>
6. CONSERVE ENERGY FUTURE. What is Wastewater Treatment? [en línea]. Miami: La Empresa [citado 20 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.conserve-energy-future.com/process-of-wastewater-treatment.php>>

7. CRISTANCHO BELLO, Angie Julieth y NOY ORTIZ, Andrés Mauricio. Diseño conceptual de una planta de tratamiento de aguas residuales para Pelikan Colombia S.A.S. Bogotá: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Modalidad trabajo de grado, 2016.
8. DHOTE, Jayashree; CHAVHAN, Arvind y INGOLE Sangita. Design of Laboratory Based Waste Water Treatment Plant. En: Int. Res. J. of Science & Engineering, march – jun, 2014. vol. 2, no. 3
9. DIARIO LA VANGUARDIA. El problema de las aguas residuales [en línea]. Bogotá: El Diario [citado 17 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.vanguardia.com/opinion/editorial/379459-el-problema-de-las-aguas-residuales>>
10. ERAZO, R. y CÁRDENAS, J.L. Planta de tratamiento de aguas residuales en la Universidad Nacional Mayor e San Marcos, Lima Perú. En: Revista Peruana de química e ingeniería química. Septiembre – octubre, 2007, vol. 3, no. 1
11. ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA. Tratamiento De Aguas Residuales [en línea]. Medellín: La Universidad [citado 18 marzo, 2018]. Disponible en internet: <URL: <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/interesantes/tratamientoresiduales/tratamientoresiduales.html>>
12. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES IDEAM. [citado 18 marzo, 2018]. Disponible en internet: <URL: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021318/03TextoCompleto.pdf>>
13. MARTÍN, Almudena. El tratamiento de aguas residuales en Colombia [en línea]. Bogotá: Twenergy [citado 16 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://twenergy.com/co/a/el-tratamiento-de-aguas-residuales-en-colombia-1142>>
14. CARMONA, Oscar. Tratamiento físico – químico de aguas residuales. Servi Aqua Móvil S.A. [en línea]. Bogotá: Artículo [citado 25 Abril, 2018]. Disponible

en Internet: <URL: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicona/R-0196.pdf> >

15. METCALF & EDDY. Wastewater Engineering. Treatment and Reuse. 4 ed. Miami: McGraw Hill, 2004.
16. MOBIUS. ¿Qué es una PTAR – Planta de Tratamiento de Aguas Residuales? [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 18 marzo, 2018]. Disponible en internet: <URL: <http://mobius.net.co/que-es-una-ptar/>>
17. QASIM, Syed R. Wastewater Treatment Plants: Planning, Design, and Operation. 2 ed. New York: CRC Press, 1998.
18. REVISTA PORTAFOLIO. Análisis/Aguas residuales y ciudades del futuro [en línea]. Bogotá: La Revista [citado 17 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.portafolio.co/opinion/redaccion-portafolio/analisis-aguas-residuales-ciudades-futuro-70248>>
19. ROMERO ROJAS, JAIRO ALBERTO. Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería. 2002. Tercer Edición.
20. ROMERO ROJAS, JAIRO ALBERTO. Potabilización del Agua. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería. 1999. Tercer Edición.
21. SSPT WATER TECHNOLOGIES. ¿Que es el Agua Residual? [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 18 marzo, 2018]. Disponible en internet: <URL: <http://www.sstp.mx/que-es-el-agua-residual.html>>
22. SPERLING, MARCOS VON. Lodos Activados, principios del tratamiento biológico de aguas residuales. San Juan de Pasto. Universidad de Nariño. 2014. Primera Edición.
23. U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Principles of Design and Operations of Wastewater Treatment Pond Systems for Plant Operators,

Engineers, and Managers. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, 2011.

24. UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO. Tratamiento de Aguas Residuales [en línea]. Barranquilla: La Universidad [citado 17 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.uniatlantico.edu.co/uatlantico/node/306>>