



**Diseño, implementación y monitoreo de un sistema de tratamiento de aguas industriales perteneciente a la empresa Halliburton campamento Ecuador – Coca, con base en la evaluación de conformidad con el Acuerdo Ministerial N° 097-A**

Moreano Culqui, Israel Fabricio

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Petroquímica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Petroquímica

PhD. Urrutia Goyes, Edgar Ricardo

17 de marzo del 2021



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN PETROQUÍMICA

### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“Diseño, implementación y monitoreo de un sistema de tratamiento de aguas industriales perteneciente a la empresa Halliburton campamento Ecuador – Coca, con base en la evaluación de conformidad con el Acuerdo Ministerial N° 097-A”** fue realizado por el señor **Moreano Culqui, Israel Fabricio**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 17 marzo de 2021



Firmado electrónicamente por:  
**EDGAR RICARDO  
URRUTIA GOYES**

PhD. Urrutia Goyes, Edgar Ricardo

C.C.: 1803599313



## Urkund Analysis Result

**Analysed Document:** TESIS - MOREANO.docx (D98801365)  
**Submitted:** 3/18/2021 7:02:00 PM  
**Submitted By:** ifmoreano@espe.edu.ec  
**Significance:** 8 %

### Sources included in the report:

TESIS-Xime-FINAL.docx (D14578160)  
Margarita Vasquez.docx (D40518944)  
Estudio para diseño planta de tratamiento Agua residuales%2c centro de faenamieto  
Provincia de Santa Elena (2016-08-30).pdf (D21898541)  
TESINA (GUALE - VELIZ)-"EVALUACION DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMESTICA DE LA URBANIZ  
ACION LA JOYA.".docx (D35241042)  
TESIS COMPLETA CORRECCION.pdf (D14204608)  
<https://docplayer.es/97095571-Universidad-tecnica-de-ambato-facultad-de-ciencia-e-ingenieria-en-alimentos-carrera-de-ingenieria-bioquimica.html>  
<http://www.repositorio.usac.edu.gt/6234/1/Estefany%20Mishel%20Morales%20Garc%C3%ADa.pdf>

### Instances where selected sources appear:

22



Firmado electrónicamente por:  
EDGAR RICARDO  
URRUTIA GOYES



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA EN PETROQUÍMICA

#### REPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Moreano Culqui, Israel Fabricio** con cédula de ciudadanía N° 0503564239, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño, implementación y monitoreo de un sistema de tratamiento de aguas industriales perteneciente a la empresa Halliburton campamento Ecuador – Coca, con base en la evaluación de conformidad con el Acuerdo Ministerial N° 097-A”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 17 marzo de 2021

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping loops and lines, representing the name of the author.

Moreano Culqui, Israel Fabricio

C.C.: 0503564239



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN PETROQUÍMICA**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo, **Moreano Culqui, Israel Fabricio**, con cédula de ciudadanía N° 0503564239, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Diseño, implementación y monitoreo de un sistema de tratamiento de aguas industriales perteneciente a la empresa Halliburton campamento Ecuador – Coca, con base en la evaluación de conformidad con el Acuerdo Ministerial N° 097-A”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 17 marzo de 2021



Moreano Culqui, Israel Fabricio

C.C.: 0503564239

### **Dedicatoria**

El presente trabajo quiero dedicarlo a mi madre María Eva Culqui Terán quien estuvo junto a mi apoyándome hasta los últimos momentos de su existencia, brindándome su apoyo, amor y sabiduría.

“A quien ahora mira el fruto de su esfuerzo desde el cielo. Con mucho amor, esmero, humildad, esfuerzo y dedicación para ti Evita”.

## Agradecimientos

Quiero agradecer a mi hermano Cristian, Homero Moreano Culqui quien me enseñó que un verdadero hombre se forja con trabajo duro, valores, dedicación, esfuerzo y amor por la familia.

A mi hermana Karina Vanessa Moreano Culqui quien no dudó en apoyarme en los momentos más difíciles de mi carrera universitaria, logrando con ello alcanzar mi objetivo.

A mi hermana Fernanda Jaqueline Moreano Culqui quien junto a mi madre siempre estuvo en todas las etapas de mi vida y ayudó a forjar al hombre en el que me he convertido, me faltarían las palabras para expresar todo el cariño y agradecimiento que te tengo. Gracias por todo hermana. Te amo.

A mis cuñada Margot Cruz quien siempre estuvo en los momentos que más lo necesité, a mis cuñados Leonardo Chalco y Alex Heredia quienes siempre me brindaron su apoyo y un buen consejo.

A mis amigos con quienes compartí buenos y malos momentos durante mi travesía universitaria. Jessenia Cela, Alex Maza, David Lisintuña, Jhonatan Pesantes, Anita Hidalgo, Yomayra Jácome, Jeison Jácome, Jhonatan Moreano, Alex Moreno, Darío Cruz, Luis Miguel, Israel Prieto y Rodrigo Cevallos muchas gracias por todos los recuerdos y la amistad brindada durante todo este tiempo. Dios los bendiga.

## Tabla de contenidos

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Carátula.....</b>                    | <b>1</b>  |
| <b>Certificación.....</b>               | <b>2</b>  |
| <b>Urkund.....</b>                      | <b>3</b>  |
| <b>Reponsabilidad de autoría.....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>Autorización de publicación.....</b> | <b>5</b>  |
| <b>Dedicatoria.....</b>                 | <b>6</b>  |
| <b>Agradecimiento .....</b>             | <b>7</b>  |
| <b>Tabla de contenidos.....</b>         | <b>8</b>  |
| <b>Índice de figuras.....</b>           | <b>13</b> |
| <b>Índice de tablas .....</b>           | <b>14</b> |
| <b>Resumen .....</b>                    | <b>16</b> |
| <b>Abstract.....</b>                    | <b>17</b> |
| <b>Generalidades.....</b>               | <b>18</b> |
| <b>Introducción .....</b>               | <b>18</b> |
| <b>Planteamiento del problema .....</b> | <b>20</b> |
| <b>Justificación e importancia.....</b> | <b>22</b> |
| <b>Objetivos .....</b>                  | <b>23</b> |
| <b>Objetivo General.....</b>            | <b>23</b> |

|   |    |
|---|----|
| <i>Objetivos Específicos</i> .....                        | 23 |
| <b>Variables de investigación</b> .....                   | 24 |
| <i>Variables independientes</i> .....                     | 24 |
| <i>Variables dependientes</i> .....                       | 24 |
| <b>Fundamentación teórica</b> .....                       | 25 |
| Halliburton Latín América S.A.....                        | 25 |
| Peisol S.A. ....  | 25 |
| Características de las aguas residuales industriales..... | 25 |
| <i>Materia orgánica</i> .....                             | 26 |
| <i>Oxígeno disuelto</i> .....                             | 26 |
| <i>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)</i> .....          | 27 |
| <i>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i> .....             | 27 |
| <i>Sólidos</i> .....                                      | 28 |
| <i>Potencial de hidrógeno (ph)</i> .....                  | 28 |
| <i>Nitrógeno</i> .....                                    | 28 |
| <i>Fósforo</i> .....                                      | 28 |
| <b>Tratamiento de aguas residuales industriales</b> ..... | 29 |
| <i>Pretratamiento y tratamientos primarios</i> .....      | 29 |
| Desbaste.....   | 30 |
| Sedimentación .....                                       | 30 |
| Filtración .....  | 31 |

|   |           |
|---|-----------|
| Flotación.....  | 31        |
| Coagulación-Floculación .....   | 32        |
| Poliectrolitos .....  | 32        |
| <i>Tratamientos secundarios.....</i>  | <i>33</i> |
| Precipitación .....   | 33        |
| Adsorción.....  | 34        |
| Tratamientos biológicos.....  | 34        |
| Sistemas aerobios .....   | 35        |
| Sistemas anaerobios .....   | 35        |
| Sistemas anóxicos.....  | 35        |
| <i>Tratamientos terciarios.....</i>   | <i>36</i> |
| Desinfección .....  | 36        |
| Desinfección con cloro (Cl <sub>2</sub> ).....                                  | 37        |
| Procesos Electroquímicos .....  | 37        |
| Intercambio iónico.....   | 38        |
| Ozonización en medio alcalino .....   | 38        |
| Metodología de desarrollo del proyecto .....                                    | 39        |
| Ubicación.....  | 39        |
| Evaluación de la planta de tratamiento de aguas industriales en operación ..... | 40        |
| Obtención de datos para diseño.....   | 45        |
| <i>Evaluación de parámetros físicos.....</i>                                    | <i>45</i> |

|   |    |
|---|----|
| <i>Evaluación de parámetros químicos</i> .....                      | 47 |
| Diseño del tren de tratamiento de aguas industriales.....           | 51 |
| Construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales .....  | 55 |
| Arranque de la planta .....   | 56 |
| Resultados y discusión.....   | 62 |
| Análisis del agua tratada .....                                     | 62 |
| <i>Prueba de hipótesis para Bario</i> .....                         | 64 |
| <i>Prueba de hipótesis para Cadmio</i> .....                        | 65 |
| <i>Prueba de hipótesis para el Nitrógeno Amoniacal</i> .....        | 66 |
| <i>Prueba de hipótesis para Cloruros</i> .....                      | 67 |
| <i>Prueba de hipótesis para Cobre</i> .....                         | 68 |
| <i>Prueba de hipótesis para Cromo total</i> .....                   | 69 |
| <i>Prueba de hipótesis para Demanda bioquímica de oxígeno</i> ..... | 70 |
| <i>Prueba de hipótesis para Fenoles</i> .....                       | 71 |
| <i>Prueba de hipótesis para Mercurio total</i> .....                | 72 |
| <i>Prueba de hipótesis para Níquel</i> .....                        | 73 |
| <i>Prueba de hipótesis para Demanda química de oxígeno</i> .....    | 74 |
| <i>Prueba de hipótesis para Plomo</i> .....                         | 75 |
| <i>Prueba de hipótesis para Sólidos totales</i> .....               | 76 |
| <i>Prueba de hipótesis para Sulfatos</i> .....                      | 77 |
| <i>Prueba de hipótesis para Hidrocarburos totales</i> .....         | 78 |

|   |    |
|---|----|
| <i>Prueba de hipótesis para Tensoactivos.</i> ..... | 79 |
| <i>Prueba de hipótesis para Zinc.</i> .....         | 80 |
| Discusión de resultados.....                        | 81 |
| Conclusiones y recomendaciones.....                 | 83 |
| Conclusiones .....                                  | 83 |
| Recomendaciones .....                               | 86 |
| Bibliografía.....                                   | 87 |
| Anexos.....   | 91 |

## Índice de figuras

|                 |   |           |
|-----------------|---|-----------|
| <b>Figura 1</b> | <i>Ubicación de la planta de tratamiento de agua industriales .....</i>   | <b>40</b> |
| <b>Figura 2</b> | <i>Efluente de la planta de tratamiento de aguas industriales<br/>existente en la empresa Halliburton. ....</i> | <b>42</b> |
| <b>Figura 3</b> | <i>Deterioro de las unidades de tratamiento.....</i>  | <b>44</b> |
| <b>Figura 4</b> | <i>Tren de tratamiento de aguas industriales .....</i>  | <b>52</b> |
| <b>Figura 5</b> | <i>Diseño hidráulico, tuberías, bombas y válvulas.....</i>  | <b>56</b> |

## Índice de tablas

|                 |   |           |
|-----------------|---|-----------|
| <b>Tabla 1</b>  | <i>Cálculo de caudal diario de efluentes industriales. ....</i>   | <b>46</b> |
| <b>Tabla 2</b>  | <i>Cuantificación de solidos sedimentables, grasas y aceites.<br/>Contenidos en un litro de muestra.....</i>  | <b>47</b> |
| <b>Tabla 3</b>  | <i>Cuantificación de temperatura, ph, DBO y DQO.<br/>Tomados en el periodo de 5 días.....</i>   | <b>48</b> |
| <b>Tabla 4</b>  | <i>Evaluación de conductividad, nitrógeno total, fosfatos y tensoactivos.<br/>Tomados en el periodo de 5 días.....</i>                              | <b>50</b> |
| <b>Tabla 5</b>  | <i>Análisis solicitados a la empresa Halliburton conforme al<br/>Acuerdo Ministerial N° 097-A. ....</i>   | <b>51</b> |
| <b>Tabla 6</b>  | <i>Datos obtenidos de la prueba de jarras .....</i>   | <b>58</b> |
| <b>Tabla 7</b>  | <i>Datos obtenidos de la segunda prueba de jarras .....</i>   | <b>58</b> |
| <b>Tabla 8</b>  | <i>Datos de ph y cloro en la etapa de coagulación – floculación.....</i>  | <b>59</b> |
| <b>Tabla 9</b>  | <i>Datos de ph y sólidos solubles realizado en la etapa de<br/>almacenamiento de agua tratada 1.....</i>  | <b>60</b> |
| <b>Tabla 10</b> | <i>Dosificación de hipoclorito de calcio.....</i>   | <b>61</b> |
| <b>Tabla 11</b> | <i>Datos obtenidos del análisis de agua tratada durante el periodo<br/>de un mes de evaluación. ....</i>  | <b>63</b> |
| <b>Tabla 12</b> | <i>Datos obtenidos del análisis de agua tratada con respecto a los<br/>límites de descarga establecidos en el Acuerdo Ministerial 097 - A. ....</i> | <b>82</b> |

**Abreviaturas**

|       |  |
|-------|--|
| DBO   | Demanda Bioquímica de oxígeno                          |
| DBO   | Demanda Química de oxígeno                             |
| PTARI | Planta de tratamiento de aguas residuales industriales |
| L     | Litros   |
| ST    | Sólidos totales  |
| pH    | Potencial hidrógeno                                    |
| O     | Oxígeno disuelto                                       |
| TPH   | Hidrocarburos totales                                  |

## Resumen

El principal enfoque del proyecto fue implementar una planta de tratamiento de aguas industriales en las instalaciones de la empresa Halliburton base Coca, en conjunto con la empresa Peisol S.A, lo cual permitió que los efluentes tratados puedan ser reutilizados para lavado de maquinaria y descarga al medio ambiente. En primera instancia se realizaron evaluaciones de las condiciones operativas de la planta de tratamiento de aguas industriales presente en las instalaciones de la empresa Halliburton base Coca, para justificar la implementación de un nuevo sistema de tratamiento. Se analizaron características físicas mediante la identificación de fugas, fisuras y corrosión de las unidades de tratamiento. Se revisaron análisis de laboratorio del agua tratada y se identificaron los parámetros fuera de norma en conformidad con el Acuerdo ministerial N° 097-A. Justificado el requerimiento de un nuevo sistema de tratamiento se realizaron evaluaciones de parámetros físicos, químicos y organolépticos del agua residual, en los que se identificaron los contaminantes presentes y se establecieron etapas de tratamiento que cumplan con especificaciones técnicas y económicas del beneficiario. Construida la planta se realizaron acondicionamientos a cada una de sus etapas, así como también de todos mecanismos industriales que intervienen. Finalmente se realizaron monitoreos de parámetros cada semana durante el periodo de un mes para garantizar el correcto desempeño de la planta de tratamiento.

Palabras clave:

- **TRATAMIENTO AGUA**
- **AGUAS INDUSTRIALES**
- **REUTILIZADOS**

### **Abstract**

The main focus of the project was to implement an industrial water treatment plant in the facilities of Halliburton – Coca, in conjunction with Peisol SA, which allowed the treated effluents to be reused for washing machinery and discharge to the environment. In first instance, evaluations of the operating conditions of the industrial water treatment plant present in the facilities of Halliburton – Coca were carried out, to justify the implementation of a new treatment system. Physical characteristics were analyzed by identifying leaks, cracks and corrosion of the treatment units. Laboratory analyzes of the treated water were reviewed and out-of-standard parameters were identified in accordance with Ministerial Agreement No. 097-A. Once the requirement of a new treatment system was justified, evaluations of physical, chemical and organoleptic parameters of the wastewater were carried out, in which the present pollutants were identified. Treatment stages were established to comply with the technical and economic specifications of the beneficiary. Once the plant was built, conditioning was carried out for each of its stages, as well as for all the industrial mechanisms involved. Finally, parameter monitoring was carried out every week for a period of one month in order to guarantee the correct performance of the water treatment plant.

Key words:

- **WATER TREATMENT**
- **INDUSTRIAL WATERS**
- **REUSED**

## 1 Generalidades

### 1.1 Introducción

A través de los diferentes siglos y cambio de culturas, el agua ha sido un factor determinante para el desarrollo de la sociedad. Por lo que el exterminio de diversas culturas por enfermedades de la época se debe al consumo de agua contaminada. En la actualidad siguen existiendo enfermedades debido al uso de agua contaminada, a la no existencia de agua potable o escases de agua. La mayor preocupación referente al consumo de agua, en tiempos actuales, es por el consumo de la misma con presencia de potenciales contaminantes químicos, contaminantes que pueden ser químicos orgánicos, químicos inorgánicos y metales pesados, procedentes de fuentes industriales, agrícolas y de la escorrentía urbana (Manahan, 2007).

Uno de los factores más importantes de contaminación del agua es por influencia humana, misma que puede ser evidenciada en aguas residuales de uso doméstico, urbanas y residuos líquidos industriales o mineros. Las composiciones de las aguas residuales pueden ser muy variables, donde cabe destacar la materia orgánica. Estos compuestos son de naturaleza reductora por lo que consumen oxígeno y pueden estar presentes de forma coloidal o disuelta. Además, existe la presencia de elementos de naturaleza inorgánica que pueden ser de muy distinta composición, desde nutrientes como el fósforo y el nitrógeno, hasta sustancias tóxicas y peligrosas como cromo y arsénico (Osorio, Torres, & Sánchez, 2010).

Muchas de las técnicas de tratamiento o remediación ambiental se enfocan en la evaluación de parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en aguas industriales, con el fin de identificar los agentes contaminantes y poder plantear una solución que disminuya el impacto ambiental por el efecto de las descargas de las

aguas residuales a los cuerpos receptores. Este método se lo desarrolla realizando evaluaciones, obtención de datos y muestreo en diferentes puntos del sistema, donde posteriormente se identifica los contaminantes a nivel de laboratorios (Osorio, Torres, & Sánchez, 2010). Para la selección y diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales hay que tener en cuenta aspectos como: caudal, concentración de contaminantes, tecnologías disponibles, espacio físico, personal técnico, y disponibilidad de recursos económicos (Noyola, Morgan, & Guereca, 2013).

Para poder establecer un tren de tratamiento de aguas residuales existen varias tecnologías, de las cuales destacan dos grandes grupos: los tratamientos fisicoquímicos y los tratamientos biológicos. Los primeros implican métodos físicos (uso de gravedad, filtración por retención física, atracción electrostática, etc.) y procesos químicos (oxidación, precipitación, coagulación, adsorción, etc.). Los segundos involucran la degradación o transformación del material orgánico por acción de microorganismos, dentro de los cuales se encuentran los sistemas aerobios (requieren de oxígeno molecular disuelto) y anaerobios (actúan en ausencia de oxígeno). La implementación de cualquiera de estas tecnologías va directamente vinculada con el tipo de contaminación que se requiera tratar (Noyola, Morgan, & Guereca, 2013).

En Ecuador, el Acuerdo Ministerial N° 097-A, redactado en el 2015, detalla los límites de descarga de agua contaminada a un cuerpo de agua dulce y afirma que los municipios tendrán la facultad de definir las cargas máximas permisibles a los cuerpos receptores, las mismas que serán aprobadas y validadas por la Autoridad Nacional y estarán consignadas en los permisos de descarga. Además, se establece que “Se prohíbe la descarga de residuos líquidos sin tratar hacia los cuerpos receptores, canales de conducción de agua a embalses, canales de riego o canales de drenaje pluvial, provenientes del lavado y/o mantenimiento de vehículos aéreos y terrestres, así como el

de aplicadores manuales y aéreos, recipientes, empaques y envases que contengan o hayan contenido agroquímicos u otras sustancias tóxicas” (Acuerdo ministerial N° 097-A, 2015).

## **1.2 Planteamiento del problema**

Con el objetivo de garantizar y preservar los derechos de la naturaleza para las presentes y futuras generaciones, el Plan Nacional de Desarrollo en Ecuador, permite y promueve el acceso a información y educación ambiental, para construir una sociedad comprometida y con conciencia social respecto a los modelos de consumo y gestión del hábitat. De esta manera se crearon leyes que incentiven una política ambiental urbana, cuyo objetivo es mejorar las capacidades de los gobiernos locales, nacionales y organizaciones sociales, que permitan prevenir y controlar la contaminación ambiental, disminuyendo potenciales consecuencias negativas sobre el medio ambiente o la salud de las personas (Consejo Nacional de Desarrollo, 2017).

Por otro lado, la producción petrolera es una de las industrias que más impactos produce al medio ambiente y a la biodiversidad tanto a nivel local como a nivel global. Las prácticas operacionales que involucran a esta industria tales como exploración, perforación, refinación, transporte y consumo generan deterioro de la biodiversidad y del medio ambiente, ya que estas operaciones relacionan tala de árboles, quema de combustible fósiles, contaminación de suelo y agua por derrames de petróleo, etc. Todas las fases de la actividad petrolera producen efectos negativos al medio ambiente y debido a esto las industrias encargadas de cada una de estas fases tienen el deber de evitar o minimizar dicho impacto que causan a la biodiversidad y medio ambiente (Orozco Barrenetxea & Pérez Serrano, 2003)

Específicamente, en la etapa de perforación y extracción de los yacimientos de petróleo intervienen múltiples instrumentos y maquinarias, las mismas que luego de su

uso son contaminadas con diversos agentes tales como: tierra, petróleo y metales pesados. Una vez cumplido su trabajo, estas herramientas y maquinarias entran a un proceso de limpieza y adecuación para su posterior reutilización. Este proceso produce descargas de aguas altamente contaminadas que se unen con aguas de procedencia industrial y forman un efluente que poseen características altamente contaminantes para el medio ambiente y la biodiversidad presentes en la zona, estas mezclas de aguas contaminadas tienen que ser tratadas para su posterior descarga al medio ambiente o posible reutilización.

Las plantas de tratamiento de aguas industriales son capaces de remover la gran mayoría de los agentes contaminantes. Estos sistemas de tratamiento de aguas contaminadas están dotados de múltiples etapas tanto físicas, químicas y biológicas. La implementación de cada una de estas etapas es realizada a partir de las características del agua cruda a ser tratada. Las plantas de tratamiento de aguas industriales tienen que estar en la capacidad de brindar efluentes que no tengan ningún efecto negativo para el medio ambiente y generalmente las características de estas descargas están normadas por organismos medio ambientales.

Debido a que la industria petrolera es el principal pilar para la economía ecuatoriana, las leyes que regulan la contaminación de cada una de estas empresas son severas. Esto hace que parte del capital que producen esté destinado a la implementación de sistemas que eliminen o disminuyan el nivel de contaminación que emiten.

Con la implementación de un sistema de tratamiento de agua residual industrial en la empresa Halliburton base Coca, se busca diezmar los agentes contaminantes aportados en los procesos industriales que posee dicha empresa, para esto se busca el cumplimiento de los límites de descarga permisible para cuerpos de agua dulce,

establecidos en el Acuerdo Ministerial N° 097-A, el mismo que permite garantizar que los efluentes tratados no causen efectos negativos al medio ambiente o al personal que labore con dicha agua.

### **1.3 Justificación e importancia**

El agua al ser fuente de vida posee estándares de calidad que tienen que ser cumplidos para no ocasionar impactos medio ambientales, por lo que este se convierte en un ente que tiene que ser cuidado. Para ello existen planes de protección, criterios específicos de control, prioridades para su remediación y estudios respecto a las relaciones existentes entre los diferentes parámetros que lo comprenden. Uno de los principales responsables de la contaminación del agua son las industrias que, al no poseer un correcto manejo de sus efluentes, ocasionan graves impactos a la flora y fauna cercana (Arocutipa, 2013)

La industria petrolera aporta una gran cantidad de agentes contaminantes al agua en cada uno de sus procesos como, por ejemplo: En la etapa de perforación las máquinas como taladros y brocas tienen que ser lavados después de su uso, generando con esto un aporte de residuos de petróleo y lodo al agua, por lo que sus aguas residuales tienen que ser tratadas utilizando procesos que eliminen contaminantes que esta pueda contener. Sus descargas al medio ambiente solo se pueden realizar si cumplen con estándares medio ambientales. En el caso de que dichas industrias no cumplan con el reglamento para descargas de aguas industriales serán sancionadas por los organismos medioambientales delegados por cada municipalidad según corresponda. La sanción puede ser de manera económica y con la obligación de remediar los daños ocasionados. Esto provoca que parte de sus ganancias se destinen en la implementación de una adecuada planta de tratamiento de agua industriales (Acuerdo ministerial N° 097-A, 2015).

Peisol S.A es una compañía ecuatoriana que brinda servicios de ingeniería y soluciones medio ambientales. Posee más de quince años de experiencia desarrollando tecnologías que contribuyan con el mejor manejo de contaminantes. Esta empresa firme en su convicción de apostar por el talento ecuatoriano ha confiado parte del proyecto de implementación de una planta de tratamiento de aguas industriales en la empresa multinacional Halliburton base Coca, para el desarrollo del presente proyecto.

La educación proporcionada a un estudiante de la carrera de ingeniería petroquímica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga, contempla dentro de su malla curricular materias como análisis químico e instrumental al igual que materias relacionadas con el medio ambiente, contaminación industrial e impacto ambiental, por lo tanto, el perfil profesional de un ingeniero petroquímico se encuentra relacionado a conocimientos petroquímicos, químicos, medioambientales, control industrial, etc. Bajo estos conocimientos adquiridos, un ingeniero petroquímico debe ser capaz de realizar trabajo de investigación y cumplir con el rol de asesor, fiscalizador y desarrollador de procesos de remediación medioambientales en la industria donde labore.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Diseñar, implementar y monitorear un sistema de tratamiento de aguas industriales perteneciente a la empresa Halliburton base Coca, en referencia a una evaluación de conformidad con el Acuerdo Ministerial N° 097-A.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

Describir las condiciones actuales de la planta de tratamiento de aguas industriales que opera en la empresa Halliburton base Coca.

Encontrar los parámetros de los efluentes industriales que se encuentran fuera de la normativa de conformidad con el Acuerdo Ministerial N° 097-A.

Analizar los parámetros químicos, físicos y organolépticos del agua a ser tratada.

Elaborar un flujograma del proceso que contenga los pretratamientos y tratamientos primarios, secundarios y terciarios a implementarse como parte de un tren de tratamiento.

Implementar una planta de tratamiento de aguas industriales que cumpla con la normativa de calidad ambiental y descarga de efluentes número 097 – A, regulada por el municipio de la ciudad de El Coca.

Realizar el acondicionamiento de cada una de las etapas del proceso, así como también de los mecanismos industriales que están relacionados en el tratamiento.

Evaluar el cumplimiento del reglamento a la ley de gestión ambiental para la prevención y control de la contaminación ambiental. Norma de calidad ambiental y descarga de efluentes, Acuerdo Ministerial número 097-A.

## **1.5 Variables de investigación**

### **1.5.1 Variables independientes**

Etapas y equipos implementados en el tren de tratamiento.

### **1.5.2 Variables dependientes**

Todos los parámetros contemplados en el Acuerdo Ministerial número 097-A.

## **2 Fundamentación teórica**

### **2.1 Halliburton Latín América S.A.**

Fundada en 1919, Halliburton tiene una trayectoria de 100 años, siendo uno de los proveedores de productos y servicios más grandes del mundo para la industria energética. Durante la década de 1930 la empresa estableció sus primeros laboratorios de investigación, comenzando con mezclas de cemento, los primeros trabajos realizados se referían a la acidificación capaz de romper la resistencia de las formaciones de piedra caliza y aumentar la producción de petróleo y gas, siendo el comienzo del futuro servicio offshore más extenso del mundo (Halliburton, 2019). En el Ecuador su base de operaciones se encuentra en la ciudad del Coca en el km 5 1/2 vía Lago Agrio, Orellana, Ecuador.

### **2.2 Peisol S.A.**

Peisol S.A., es una compañía especializada en brindar servicios de Ingeniería y soluciones de proyectos integrales, con tecnología de vanguardia, talento humano idóneo e infraestructura técnica apropiada. Con más de quince años de experiencia entiende la necesidad del cliente y elabora soluciones integrales, convirtiéndonos en un socio estratégico, más allá de un proveedor. Ubicada en Puyungo s/n Jumandy Sucumbíos - Lago Agrio - Nueva Loja (Peisol, 2017)

### **2.3 Características de las aguas residuales industriales**

Se considera que son todas las aguas residuales vertidas desde localidades en donde se utilizaron para efectuar cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial.

Los compuestos orgánicos e inorgánicos se encuentran en aguas residuales procedentes de instalaciones industriales. Los efluentes procedentes de la industria poseen sustancias que no pueden ser eliminadas con un tratamiento convencional, ya que pueden tener concentraciones elevadas o ser de naturaleza química. Dentro de las sustancias químicas se han identificado compuestos orgánicos e inorgánicos, las mismas que poseen una regulación especial debido a su toxicidad o efectos biológicos a largo plazo (Fernández Alba, García Rosal, & Dorado Valiño, 2006).

Un análisis de caracterización de aguas residuales a ser tratadas, es fundamental para garantizar el éxito de la depuradora. La baja eficiencia de las depuradoras se debe, en gran medida, a una mala caracterización de las aguas a ser tratadas.

### **2.3.1 *Materia orgánica***

Está formada principalmente por: Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno y Azufre, se encuentran constituyendo proteínas procedentes de restos de origen animal y vegetal, carbohidratos, aceites y grasas y surfactantes (Fernández Alba, García Rosal, & Dorado Valiño, 2006).

### **2.3.2 *Oxígeno disuelto***

Es un parámetro fundamental en los ecosistemas acuáticos y su valor debería estar por encima de los 4 mg/L para asegurar la sobrevivencia de la mayor parte de los organismos superiores. Se usa como indicador de la contaminación o, por decirlo así, de la salud de los cuerpos hídricos. Para el correcto funcionamiento de los tratamientos aerobios de las aguas residuales, es necesario asegurar una concentración mínima de 1 mg/L (Fernández Alba, García Rosal, & Dorado Valiño, 2006).

### **2.3.3 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

Es una medida indirecta de la cantidad de materia orgánica contenida en una muestra de agua, determinada por el consumo de oxígeno que hacen los microorganismos para degradar los compuestos biodegradables. Se evalúa analíticamente incubando una muestra con microorganismos por 5 días a 20 °C, tiempo después del cual se lee la concentración final de oxígeno y se compara con la inicial. Esta prueba es conocida como DBO5 (Fernández Alba, García Rosal, & Dorado Valiño, 2006).

### **2.3.4 Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Es también una medida indirecta de la cantidad de materia orgánica contenida en una muestra. A diferencia de la DBO, esta prueba emplea un oxidante fuerte (dicromato de potasio –  $K_2Cr_2O_7$ ) en un medio ácido (ácido sulfúrico –  $H_2SO_4$ ) en vez de microorganismos. Para el control de una depuradora, este método se prefiere sobre el de la DBO, debido a que el resultado de la DQO se obtiene en unas 3 horas y con un error mucho menor que la DBO obtenida a los 5 días. La relación entre la DBO y la DQO es usada para estimar la biodegradabilidad de un vertido así:

$DBO/DQO \geq 4$  (Muy biodegradable)

$DBO/DQO \leq 2$  (No biodegradable)

Tanto la DQO como la DBO se emplean para determinar la calidad del agua o la carga contaminante de un vertido, para diseñar las unidades de tratamiento biológico y para evaluar o controlar la eficiencia de los tratamientos (Fernández Alba, García Rosal, & Dorado Valiño, 2006).

### **2.3.5 Sólidos**

La materia orgánica se presenta, a menudo en forma de sólidos. Estos sólidos pueden ser suspendidos (SS), disueltos (SD), los que también pueden ser volátiles (SV), los cuales se presumen orgánicos, o fijos (SF) que suelen ser inorgánicos. Parte de los sólidos suspendidos pueden ser también sedimentables (SSed). Todos ellos se determinan gravimétricamente (Fernández Alba, García Rosal, & Dorado Valiño, 2006).

### **2.3.6 Potencial de hidrógeno (pH)**

Tiene importancia en el control de los procesos biológicos del tratamiento de las aguas residuales (TAR). La mayoría de los microorganismos responsables de la depuración de las aguas residuales se desarrollan en un rango de pH óptimo entre 6,5 y 8,5 unidades (Fernández Alba, García Rosal, & Dorado Valiño, 2006).

### **2.3.7 Nitrógeno**

Es el componente principal de las proteínas y es un nutriente esencial para las algas y bacterias que intervienen en la depuración del agua residual. Puede presentarse en forma de nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal (producto de la descomposición del nitrógeno orgánico) y formas oxidadas como nitritos y nitratos. Valores excesivamente altos de nitrógeno amoniacal (>1500 mg/L) se consideran inhibitorios para los microorganismos responsables del TAR (Fernández Alba, García Rosal, & Dorado Valiño, 2006).

### **2.3.8 Fósforo**

Es junto con el nitrógeno, un nutriente esencial para el crecimiento de los microorganismos. No obstante, valores elevados pueden causar problemas de hipereutrofización en los cuerpos de agua loticos (lagos, embalses, lagunas) (Fernández Alba, García Rosal, & Dorado Valiño, 2006).

## **2.4 Tratamiento de aguas residuales industriales**

Los tratamientos a los que se deben someter los efluentes tienen que garantizar la eliminación o recuperación del compuesto orgánico en el grado requerido por la legislación que regula el vertido del efluente o para garantizar las condiciones mínimas del proceso en el caso de reutilización o recirculación de la corriente para uso interno. El nivel máximo admisible de contaminante puede conseguirse mediante la utilización de diversas técnicas tanto destructivas como no destructivas (Alvarez Da Costa, 2012).

### **2.4.1 Pretratamiento y tratamientos primarios**

La remoción de materia en suspensión puede ser de muy diversa índole, desde partículas de varios centímetros y muy densas (normalmente inorgánicas), hasta suspensiones coloidales muy estables y con tamaños de partícula de hasta unos pocos nanómetros (normalmente de naturaleza orgánica). También la concentración de los mismos, tanto en el agua a tratar como en el agua una vez tratada, juega un papel fundamental a la hora de la elección del tratamiento más conveniente. Las operaciones para eliminar este tipo de contaminación de aguas suelen ser las primeras en efectuarse, dado que la presencia de partículas en suspensión suele no ser indeseable en muchos otros procesos de tratamiento (Fernández Alba, García Rosal, & Dorado Valiño, 2006).

La eliminación de esta materia en suspensión se suele hacer mediante operaciones mecánicas. Sin embargo, en muchos casos, y para favorecer esa separación, se utilizan aditivos químicos, denominándose en este caso tratamientos químico-físicos. A continuación, se describen las operaciones unitarias más habituales. La utilización de una u otra es función de las características de las partículas (tamaño, densidad, forma, etc.) así como de la concentración de las mismas.

#### **2.4.1.1 Desbaste**

Es una operación en la que se trata de eliminar sólidos de mayor tamaño que el que habitualmente tienen las partículas que arrastran las aguas. El objetivo es eliminarlos y evitar que dañen equipos posteriores del resto de tratamientos. Suele ser un tratamiento previo a cualquier otro. El equipo que se suele utilizar son rejillas por las que se hace circular el agua, construidas por barras metálicas de 6 o más mm, dispuestas paralelamente y espaciadas entre 10 y 100 mm. Se limpian con rastrillos que se accionan normalmente de forma mecánica. En otros casos, si el tipo de sólidos lo permite, se utilizan trituradoras, reduciendo el tamaño de sólidos y separándose posteriormente por sedimentación u otras operaciones (Fernández Alba, García Rosal, & Dorado Valiño, 2006).

#### **2.4.1.2 Sedimentación**

Operación física en la que se aprovecha la fuerza de la gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo del sedimentador. Esta operación será más eficaz cuanto mayor sea el tamaño y la densidad de las partículas a separar del agua, es decir, cuanto mayor sea su velocidad de sedimentación, siendo el principal parámetro de diseño para estos equipos. A esta operación de sedimentación se le suele denominar también decantación. Realmente, este tipo de partículas (grandes y densas, como las arenas) se tienen en pocas ocasiones en aguas industriales. Lo más habitual es encontrar sólidos poco densos, por lo que es necesario, para hacer más eficaz la operación, llevar a cabo una coagulación-floculación previa, que consiste en la adición de ciertos reactivos químicos para favorecer el aumento del tamaño y densidad de las partículas. La forma de los equipos donde llevar a cabo la sedimentación es variable, en función de las

características de las partículas a sedimentar (tamaño, forma, concentración, densidad, etc.) (Fernández Alba, García Rosal, & Dorado Valiño, 2006).

#### **2.4.1.3 Filtración**

La filtración es una operación en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión. El medio poroso tradicionalmente utilizado es un lecho de arena, de altura variable, dispuesta en distintas capas de distinto tamaño de partícula, siendo la superior la más pequeña y de entre 0.15 y 0.3 mm. Es una operación muy utilizada en el tratamiento de aguas potables, así como en el tratamiento de aguas para reutilización, para eliminar la materia en suspensión que no se ha eliminado en anteriores operaciones (sedimentación). En aguas industriales hay más variedad en cuanto al material filtrante utilizado, siendo habitual el uso de Tierra de Diatomeas. También es habitual, para mejorar la eficacia, realizar una coagulación-floculación previa (Arocutipa, 2013).

#### **2.4.1.4 Flotación**

Operación física que consiste en generar pequeñas burbujas de gas (aire), que se asociarán a las partículas presentes en el agua y serán elevadas hasta la superficie, de donde son arrastradas y sacadas del sistema. Obviamente, esta forma de eliminar materia en suspensión será adecuada en los casos en los que las partículas tengan una densidad inferior o muy parecida a la del agua, así como en el caso de emulsiones, es decir, una dispersión de gotas de un líquido inmiscible, como en el caso de aceites y grasas. En este caso las burbujas de aire ayudan a “flotar” más rápidamente estas gotas, dado que generalmente la densidad de estos líquidos es menor que la del agua. En esta operación hay un parámetro importante a la hora del diseño: La relación aire/sólidos, ml/L de aire liberados en el sistema por cada mg/L de concentración de

sólidos en suspensión contenidos en el agua a tratar. Es un dato a determinar experimentalmente y suele tener un valor óptimo comprendido entre 0.005 y 0.06 (Fernández Alba, García Rosal, & Dorado Valiño, 2006).

#### **2.4.1.5 Coagulación - Floculación**

En muchos casos parte de la materia en suspensión puede estar formada por partículas de muy pequeño tamaño ( $10^{-6}$  –  $10^{-9}$  nm), lo que conforma una suspensión coloidal. Estas suspensiones coloidales suelen ser muy estables, en muchas ocasiones debido a interacciones eléctricas entre las partículas. Por tanto, tienen una velocidad de sedimentación extremadamente lenta, por lo que haría inviable un tratamiento mecánico clásico. Una forma de mejorar la eficacia de todos los sistemas de eliminación de materia en suspensión es la adición de ciertos reactivos químicos que, en primer lugar, desestabilicen la suspensión coloidal (coagulación) y a continuación favorezcan la floculación de las mismas para obtener partículas fácilmente sedimentables. Es una operación que se utiliza a menudo, tanto en el tratamiento de aguas residuales urbanas y potables como en industriales (industria de la alimentación, pasta de papel, textiles, etc.). Los coagulantes suelen ser productos químicos que en solución aportan carga eléctrica contraria a la del coloide. Habitualmente se utilizan sales con cationes de alta relación carga/masa ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ) junto con polielectrolitos orgánicos, cuyo objetivo también debe ser favorecer la floculación (Osorio, Torres, & Sánchez, 2010).

#### **2.4.1.6 Polielectrolitos**

Pueden ser polímeros naturales o sintéticos, no iónicos (poliacrilamidas) aniónicos (ácidos poliacrílicos) o catiónicos (polivinilaminas). Las cantidades a dosificar son mucho menores que para las sales, pero tanto la eficacia como el coste es mucho mayor. Los equipos en los que se lleva a cabo este proceso, suelen constar de dos partes bien diferenciadas: Una primera donde se adicionan los reactivos, y se somete el

agua a una fuerte agitación y durante un corto periodo de tiempo, con el objetivo de conseguir una buena y rápida mezcla de reactivos y coloide para llevar a cabo la coagulación. A continuación, se pasa a una zona donde la agitación es mucho menos intensa y donde el agua permanece más tiempo. En este caso el objetivo es que se produzca la floculación. De esta forma la materia en suspensión tiene unas características mucho más adecuadas para su eliminación mecánica (Fernández Alba, García Rosal, & Dorado Valiño, 2006).

#### **2.4.2 Tratamientos secundarios**

Al igual que en el caso de la materia en suspensión, la materia disuelta puede tener características y concentraciones muy diversas: desde grandes cantidades de sales inorgánicas disueltas (salmueras) orgánicas (materia orgánica biodegradable en industria de alimentación) hasta extremadamente pequeñas cantidades de inorgánicos (metales pesados) y orgánicos (pesticidas) pero necesaria su eliminación dado su carácter peligroso. Algunos de estos tratamientos están siendo desplazados por otros más avanzados y emergentes, como son los procesos de oxidación avanzada y las operaciones con membrana, y especialmente en el caso de las aguas industriales (Marín Galvín, 2013).

##### **2.4.2.1 Precipitación**

Consiste en la eliminación de una sustancia disuelta indeseable, por adición de un reactivo que forme un compuesto insoluble con el mismo, facilitando así su eliminación por cualquiera de los métodos de eliminación de la materia en suspensión. Sin embargo, el término precipitación se utiliza más para describir procesos como la formación de sales insolubles, o la transformación química de un ion en otro con mayor o menor estado de oxidación que provoque la formación de un compuesto insoluble. Un reactivo de muy frecuente uso en este tipo de operaciones es el  $\text{Ca}^{2+}$ , dada la gran

cantidad de sales insolubles que forma, por ejemplo, es el método utilizado para la eliminación de fosfatos (nutriente). Además, posee cierta capacidad coagulante, lo que hace su uso masivo en aguas residuales urbanas y muchas industriales de características parecidas (García Gómez & Gortáres Moroyoqui, 2011).

#### **2.4.2.2 Adsorción**

El proceso de adsorción consiste en la captación de sustancias solubles en la superficie de un sólido. Un parámetro fundamental en este caso será la superficie específica del sólido, dado que el compuesto soluble a eliminar se ha de concentrar en la superficie del mismo. La necesidad de una mayor calidad de las aguas está haciendo que este tratamiento esté en auge. Es considerado como un tratamiento de refino, y por lo tanto al final de los sistemas de tratamientos más usuales, especialmente con posterioridad a un tratamiento biológico (García Gómez & Gortáres Moroyoqui, 2011).

#### **2.4.2.3 Tratamientos biológicos**

Constituyen una serie de importantes procesos de tratamiento que tienen en común la utilización de microorganismos (entre las que destacan las bacterias) para llevar a cabo la eliminación de componentes indeseables del agua, aprovechando la actividad metabólica de los mismos sobre esos componentes. La aplicación tradicional consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes (N y P). Es uno de los tratamientos más habituales, no solo en el caso de aguas residuales urbanas, sino en buena parte de las aguas industriales. En la mayor parte de los casos, la materia orgánica constituye la fuente de energía y de carbono que necesitan los microorganismos para su crecimiento. Además, también es necesaria la presencia de nutrientes, que contengan los elementos esenciales para el crecimiento, especialmente los compuestos que contengan N y P, y, por último, en el caso de sistema aerobio, la

presencia de oxígeno disuelto en el agua. Este último aspecto será clave a la hora de elegir el proceso biológico más conveniente. En el metabolismo bacteriano juega un papel fundamental el elemento aceptor de electrones en los procesos de oxidación de la materia orgánica. Este aspecto, además, tiene una importante incidencia en las posibilidades de aplicación al tratamiento de aguas (Pérez Olmo & Menéndez Gutiérrez, 2007).

#### **2.4.2.4 Sistemas aerobios**

La presencia de  $O_2$  hace que este elemento sea el aceptor de electrones, por lo que se obtienen unos rendimientos energéticos elevados, provocando una importante generación de fangos, debido al alto crecimiento de las bacterias aerobias. Su aplicación a aguas residuales puede estar muy condicionada por la baja solubilidad del oxígeno en el agua (Pérez Olmo & Menéndez Gutiérrez, 2007).

#### **2.4.2.5 Sistemas anaerobios**

En este caso el aceptor de electrones puede ser el  $CO_2$  o parte de la propia materia orgánica, obteniéndose como producto de esta reducción el carbono en su estado más reducido,  $CH_4$ . La utilización de este sistema, tendría, como ventaja importante, la obtención de un gas combustible (Pérez Olmo & Menéndez Gutiérrez, 2007).

#### **2.4.2.6 Sistemas anóxicos**

Se denominan así los sistemas en los que la ausencia de  $O_2$  y la presencia de  $NO_3$  hacen que este último elemento sea el aceptor de electrones, transformándose, entre otros, en  $N_2$ , elemento completamente inerte. Por tanto, es posible, en ciertas condiciones, conseguir una eliminación biológica de nitratos (desnitrificación) (Pérez Olmo & Menéndez Gutiérrez, 2007).

### **2.4.3 Tratamientos terciarios**

Consiste en una serie de procesos destinados a conseguir una calidad del efluente superior a la del tratamiento secundario convencional. Los procesos que podemos encontrar en este tipo de tratamientos son, separación de sólidos en suspensión, adsorción en carbón activado, intercambio iónico, ósmosis inversa, electrólisis, oxidación química, métodos de eliminación de nutrientes y procesos para la purificación de agua residuales. Muchos de estos procesos no se emplean demasiado en el tratamiento de las aguas residuales, pero su empleo a mayor escala está previsto conforme a las exigencias de calidad de los efluentes (Alvarez Da Costa, 2012).

#### **2.4.3.1 Desinfección**

La desinfección pretende la destrucción o inactivación de los microorganismos que puedan causarnos enfermedades, dado que el agua es uno de los principales medios por el que se transmiten. Los organismos causantes de enfermedades pueden ser bacterias, virus, protozoos y algunos otros. La desinfección se hace imprescindible para la protección de la salud pública, si el agua a tratar tiene como finalidad el consumo humano. En el caso de aguas residuales industriales, el objetivo puede ser no solo desactivar patógenos, sino cualquier otro organismo vivo, si lo que se pretende es reutilizar el agua. Para llevar a cabo la desinfección se pueden utilizar distintos tratamientos: Tratamiento físico (calor, radiación.), ácidos o bases, etc. Pero fundamentalmente se utilizan agentes oxidantes, entre los que cabe destacar el clásico  $Cl_2$  y algunos de sus derivados, o bien procesos de oxidación avanzada ( $O_3$ , fotocatalisis heterogénea). La utilización de desinfectantes persigue tres finalidades: producir agua libre de patógenos u organismos vivos, evitar la producción de subproductos indeseables de la desinfección y mantener la calidad bacteriológica en la red conducción posterior (Alvarez Da Costa, 2012).

### **2.4.3.2 Desinfección con cloro (Cl<sub>2</sub>)**

Es el oxidante más ampliamente utilizado. Hay una serie de factores que influyen en el proceso: Naturaleza y concentración de organismos a destruir, sustancias disueltas o en suspensión en el agua, así como la concentración de cloro y el tiempo de contacto utilizado. Las sustancias presentes en el agua influyen en gran medida en la cloración: En presencia de sustancias orgánicas, el poder desinfectante es menor. La presencia de amonio consume cloro (formación de cloraminas). El hierro y manganeso aumentan la demanda del mismo. En este sentido, es importante realizar un estudio de la demanda del cloro para determinar la dosis de cloro correcta para cada tipo de agua (Alvarez Da Costa, 2012).

### **2.4.3.3 Procesos Electroquímicos**

Está basado en la utilización de técnicas electroquímicas, haciendo pasar una corriente eléctrica a través del agua (que necesariamente ha de contener un electrolito) y provocando reacciones de oxidación-reducción tanto en el cátodo como en el ánodo. Por tanto, se utiliza energía eléctrica como vector de descontaminación ambiental, siendo su coste uno de las principales desventajas de este proceso. Sin embargo, como ventajas cabe destacar la versatilidad de los equipos, la ausencia tanto de la utilización de reactivos como de la presencia de fangos y la selectividad, pues controlar el potencial de electrodo permite seleccionar la reacción electroquímica dominante deseada. Las consecuencias de las reacciones que se producen pueden ser indirectas, como en el caso de la electrocoagulación, electroflotación o electrofloculación, donde los productos formados por electrolisis sustituyen a los reactivos químicos, y supone una alternativa con futuro a la clásica adición de reactivos (Fernández Alba, García Rosal, & Dorado Valiño, 2006).

#### **2.4.3.4 Intercambio iónico**

Es una operación en la que se utiliza un material, habitualmente denominado resinas de intercambio iónico, que es capaz de retener selectivamente sobre su superficie los iones disueltos en el agua, los mantiene temporalmente unidos a la superficie, y los cede frente a una disolución con un fuerte regenerante. La aplicación habitual de estos sistemas es, por ejemplo, la eliminación de sales cuando se encuentran en bajas concentraciones, siendo típica la aplicación para la desmineralización y el ablandamiento de aguas, así como la retención de ciertos productos químicos y la desmineralización de jarabes de azúcar (Fernández Alba, García Rosal, & Dorado Valiño, 2006).

#### **2.4.3.5 Ozonización en medio alcalino**

El ozono es inestable en agua: tiende a descomponerse en una secuencia de reacciones que generan radicales entre los que se encuentra el radical hidroxilo. A valores de pH elevados, la velocidad de autodescomposición de ozono en agua se incrementa y con ella, la velocidad de generación de radicales. En estas condiciones, la oxidación de los compuestos orgánicos contenidos en el efluente, se produce por la combinación de dos mecanismos: la vía directa que representa la reacción entre la molécula orgánica y el ozono disuelto, y la vía indirecta, mediante la cual los radicales hidroxilos actúan como oxidantes (Fernández Alba, García Rosal, & Dorado Valiño, 2006).

### **3 Metodología de desarrollo del proyecto**

El presente proyecto se realizó en las instalaciones de la empresa multinacional Halliburton base Coca – Ecuador, en conjunto con la empresa ecuatoriana Peisol S.A, dicho proyecto tuvo como objetivo la construcción de una planta de tratamiento de agua industriales que cumple con los parámetros establecido por el Acuerdo Ministerial N° 097-A, mismo que permitió a la empresa Halliburton reutilizar el agua tratada y su liberación al medio ambiente sin que ésta cause un impacto medio ambiental en las zonas aledañas.

Los datos y variables necesarios para este proyecto se recolectaron de manera in situ mediante toma de muestras y análisis físico - químico de las mismas. Dichos análisis se realizaron con los equipos de monitoreo y análisis de la empresa Peisol S.A.

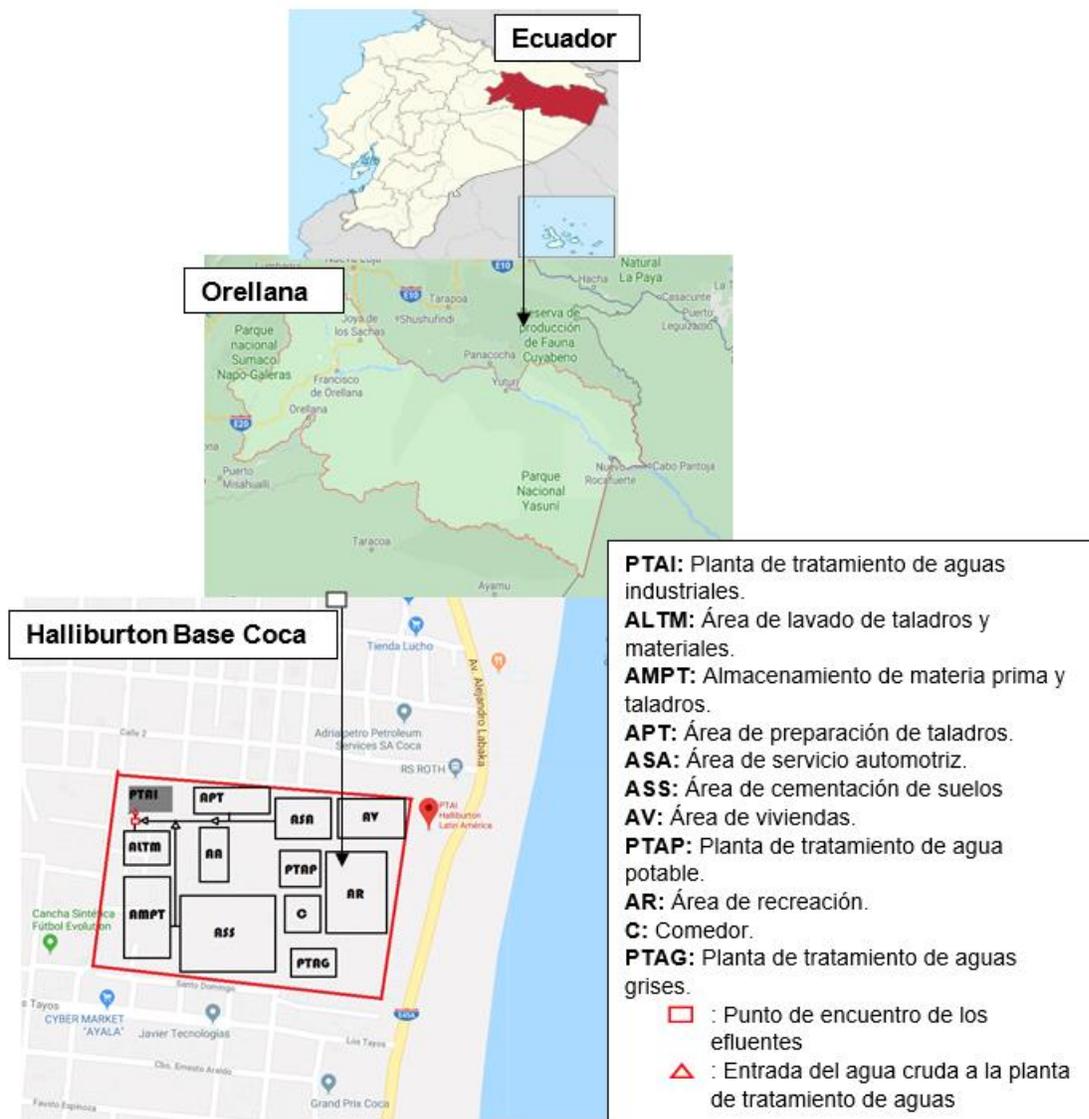
#### **3.1 Ubicación**

En Ecuador, el centro de operaciones, logística y bodega de almacenamiento de productos de Halliburton, se ubica en la provincia de Orellana, ciudad Francisco de Orellana en la intersección de la Av. Alejandro Labaka y calle Santo Domingo.

Para el desarrollo del presente estudio se tomó el espacio físico ubicado en la zona noroeste de la base, donde se encontraba instalada una Planta de tratamiento de aguas industriales, la misma que se ubicaba de forma estratégica rodeada de múltiples puntos de descarga de aguas industriales, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1.

Ubicación de la planta de tratamiento de agua industriales



Nota: Halliburton Base Coca. Tomada de Google Maps (s.f).

### 3.2 Evaluación de la planta de tratamiento de aguas industriales en operación

En la evaluación de la planta de tratamiento de aguas industriales en operación, se identificaron ocho etapas de tratamiento, las cuales fueron: trampas API, tanque subterráneo de almacenamiento, tanque sedimentador, decantación de lodos, tanque

de aireación, filtro de arena 1, filtro de arena 2 y tanque de cloración y evacuación. En el Anexo 1 se ilustra el flujograma del proceso.

Todos los efluentes industriales de la empresa Halliburton son dirigidos a la planta de tratamiento de aguas industriales en operación. El proceso de tratamiento iniciaba en las trampas API, a esta etapa se la denominaba como un proceso físico en el que intervienen múltiples cámaras en forma de laberinto contenidas dentro de una piscina hecha de cemento y recubierta por pintura permeable, la etapa cumplía con la labor de remover grasas, aceites, petróleo y partículas sólidas capaces de flotar o sedimentarse. Todo esto se llevaba a cabo por la acción del flujo del fluido, gravedad, densidad y las características no miscibles que poseen algunos agentes contaminantes con respecto al agua. En la inspección de esta etapa se pudo evidenciar grietas y fisuras en su estructura, las mismas que causaban derrames de agua contaminada con residuos de petróleo, sólidos suspendidos, detergentes, etc. El efluente de esta etapa contenía residuos de aceites, grasas y petróleo. Tal como se puede evidenciar en el Figura 2.

**Figura 2.**

*Efluente de la planta de tratamiento de aguas industriales existente en la empresa Halliburton.*



*Nota:* Muestra efluente de la antigua planta de tratamiento de aguas industriales perteneciente a la empresa Halliburton.

Los efluentes de las trampas API eran llevados por acción de la gravedad hasta el tanque subterráneo de almacenamiento mediante tubos de PVC. La estructura de dicho tanque estaba conformada por un cubo hueco hecho a base de cemento y recubierto por pintura impermeable, constaba de una tapa metálica la cual permitía a los operarios ingresar dentro del tanque y realizar mantenimiento. Esta etapa tenía por objetivo almacenar el agua libre de partículas sólidas, grasas, aceites y restos de petróleo. En dicha etapa se identificaron residuos de petróleo, partículas sólidas, además de residuos de metales en estado de oxidación provenientes de la tapa metálica que conformaban la estructura del tanque.

Mediante una bomba sumergible el líquido contenido dentro del tanque subterráneo de almacenamiento era llevado hasta el tanque sedimentador, esta etapa la constituía un cilindro metálico dispuesto en forma vertical, el líquido proveniente de la etapa anterior ingresaba por la parte superior del cilindro chocando con un deflector, este ayudaba a la sedimentación de lodos. En esta etapa se identificaron grandes cantidades de corrosión que provocaba derrames de fluido y problemas estructurales que pudieron causar accidentes.

Por la parte lateral del tanque sedimentador el flujo era enviado al tanque de aireación, el mismo que se constituía de un cilíndrico metálico dispuesto en forma vertical. En esta etapa se dotaba al flujo de oxígeno disuelto por acción de un compresor y se recirculaba al tanque sedimentador, con la finalidad de activar microorganismos aerobios que consumieron la carga orgánica contenida en el agua de tratamiento, esta acción producía lodos residuales.

Los lodos residuales producidos eran evacuados por la parte inferior del tanque sedimentador y llevados hacia las cámaras de decantación de lodos, esta etapa estaba constituida por cinco cámaras rectangulares con medios filtrantes de diferentes granulometrías. Los lodos eran sometidos a estos medios filtrantes mismos que producían su deshidratación, esto facilitaba su recolección para posteriormente llevarlos a disposición final.

De la parte lateral del tanque de aireación se sustraía líquido clarificado, dicho flujo era sometido a dos filtros de arena de distinta granulometría, los filtros se constituían por cilindros metálicos dispuestos de forma vertical y llenos del medio filtrante. El efluente tenía que cumplir con características como: inoloro e incoloro.

Finalmente, el flujo era sometido a desinfección por contacto directo con pastillas de hipoclorito de calcio en el tanque de cloración, dicho tanque estaba hecho de plástico.

Las cuatro últimas etapas conformadas por: tanque de aireación, filtro de arena 1, filtro de arena 2 y tanque de cloración, no se encontraba en funcionamiento en el momento de la evaluación, esto debido a que bombas y válvulas se encontraban averiadas. Sin embargo, se pudo identificar un claro deterioro físico. Tal como se muestra en el Anexo 2 y Figura 3.

### **Figura 3.**

*Deterioro de las unidades de tratamiento*



*Nota:* Unidad de sedimentación de planta de tratamiento de aguas industriales perteneciente a la empresa Halliburton.

### **3.3 Obtención de datos para diseño**

Los datos para diseño facilitaron la elección de pretratamientos, tratamientos primarios, secundarios y terciarios. Estos pueden variar debido al tipo de industria y los contaminantes que esta pueda aportar, debido a esto el tren de tratamiento se diseñó específicamente para la remoción de los contaminantes presente en las aguas residuales industriales de la empresa Halliburton base Coca – Ecuador.

Se tomaron muestras en el punto de encuentro de todos los efluentes de la industria y se evaluaron características químicas, físicas y organolépticas. En la que se enfocan los siguientes parámetros: caudal, temperatura, pH, sólidos sedimentables, DBO, DQO, sólidos totales (suspendidos y disueltos), nitrógeno total, fósforo, grasas, aceites, tensoactivos (presencia de agentes de limpieza).

#### **3.3.1 Evaluación de parámetros físicos**

Se identificaron los volúmenes de flujo de agua cruda que la industria produce diariamente, a partir de este dato se dimensionaron todas las etapas de tratamiento. Las evaluaciones se realizaron en el punto de encuentro de todos los efluentes, mismo que posee una capacidad de almacenamiento de 2.5 metros cúbicos (1.25 metros de ancho, 1.25 metros de largo, 2.75 metros de profundidad). Los cálculos se efectuaron durante cinco días realizando una medición diaria al inicio de labores (8:00 AM) y al finalizar la jornada (5:00 PM), se tomó este periodo ya que las labores de la industria son repetitivas de semana a semana, debido a esto el periodo elegido ayudó a identificar todo el aporte de contaminación que la industria genera. Se registraron los valores de altura del líquido y se multiplicaron por las dimensiones de largo y ancho consiguiendo de esta manera el valor volumétrico.

Para obtener el volumen diario producido se restaron los valores de volumen medido a las 5:00 PM del medido a las 8:00 AM. los mismos que se encuentran reportados en la Tabla 1.

**Tabla 1.**

*Cálculo de caudal diario de efluentes industriales.*

| Día | Altura del líquido (8 AM) en metros | Volumen del líquido (8 AM) en metros cúbicos | Altura del líquido (5 PM) en metros | Volumen del líquido (5 PM) en metros cúbicos | Volumen diario en metros cúbicos |
|-----|-------------------------------------|--|-------------------------------------|--|----------------------------------|
| 1   | 0,400                               | 0,625  | 1,870                               | 2,922  | 2,297                            |
| 2   | 0,350                               | 0,547  | 1,500                               | 2,344  | 1,797                            |
| 3   | 0,520                               | 0,813  | 2,200                               | 3,438  | 2,625                            |
| 4   | 0,250                               | 0,391  | 1,250                               | 1,953  | 1,563                            |
| 5   | 0,380                               | 0,594  | 1,690                               | 2,641  | 2,047                            |

*Nota:* Datos obtenidos de la empresa Halliburton.

En la determinación del contenido de sólidos sedimentables, grasas y aceites se realizaron pruebas diarias durante cinco días al finalizar la jornada laboral (5:00 PM), debido a que a dicha hora el tanque de encuentro de todos los efluentes recolecta toda el agua residual producida en el día. Las pruebas se las realizaron con la ayuda de una probeta graduada de 1000 ml. Inicialmente se homogeneizaron las muestras de agua contenida en el punto de encuentro de todos los efluentes y se tomaron muestras de 1000 ml en una probeta graduada, se dejaron reposar durante 30 minutos y se reportaron los resultados en términos de mililitros del contenido de sólidos sedimentables, así como grasas y aceites. Norma Técnica Ecuatoriana. (NTE INEN 2169, 2013). Estos datos se reportaron en la Tabla 2.

**Tabla 2.**

*Cuantificación de sólidos sedimentables, grasas y aceites. Contenidos en un litro de muestra.*

| <b>Día</b> | <b>Volumen de sólidos sedimentables (ml)</b> | <b>Volumen de grasas y aceites (ml)</b> |
|------------|--|---|
| 1          | 50   | 10                                      |
| 2          | 20   | 8                                       |
| 3          | 100  | 5                                       |
| 4          | 75   | 16                                      |
| 5          | 45   | 10                                      |

*Nota:* Datos obtenidos de la empresa Halliburton mediante una probeta graduada de 1000 ml.

La evaluación del caudal, sólidos sedimentables, grasas y aceites, permitieron identificar qué tipo de pretratamientos son los idóneos para esta clase de aguas residuales. Existen diversos pretratamientos en los cuales se puede encontrar el cribado, desarenado, desaceitado y homogenización. Esta etapa fue esencial para que exista un correcto saneamiento ya que el arrastre de estos contaminantes a posteriores etapas puede provocar inestabilidad en los procesos consecuentes.

### **3.3.2 Evaluación de parámetros químicos**

En la cuantificación de los parámetros químicos se realizaron mediante equipos de monitoreo marca HACH con certificación ISO 9001.

La medición de la temperatura y pH se realizaron diariamente durante el periodo de 5 días al finalizar la jornada laboral (5:00 PM), debido a que a dicha hora el tanque de encuentro de todos los efluentes recolecta toda el agua residual producida en el día. En el análisis se emplearon sondas digitales de pH marca HACH con sensores de temperatura integrados con las siguientes características: Precisión  $\pm 0.02$  pH y rango de 0 – 14 pH. Los resultados son presentados en la Tabla 3.

**Tabla 3.**

*Cuantificación de temperatura, pH, DBO y DQO. Tomados en el periodo de 5 días.*

| <b>Día</b> | <b>pH</b> | <b>Temperatura<br/>(°C)</b> | <b>DBO<br/>(mg/L)</b> | <b>DQO<br/>(mg/L)</b> | <b>Relación<br/>DBO/DQO</b> |
|------------|-----------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|
| 1          | 8,45      | 26,2                        | 195                   | 4529                  | 0,043                       |
| 2          | 7,64      | 27,7                        | 189                   | 923                   | 0,205                       |
| 3          | 8,02      | 27,4                        | 163                   | 1826                  | 0,089                       |
| 4          | 7,46      | 25,3                        | 179                   | 1269                  | 0,141                       |
| 5          | 7,92      | 27,6                        | 155                   | 1496                  | 0,104                       |

*Nota:* Datos obtenidos de la empresa Halliburton mediante equipos de monitoreo marca HACH con certificación ISO 9001.

La evaluación de los parámetros DBO y DQO se realizaron diariamente durante el periodo de 5 días al finalizar la jornada laboral (5:00 PM). Se emplearon reactores digitales marca HACH, programados para digestiones standard (DBO y DQO) en el cual se colocaron 20 ml de agua cruda libre de aceites y sólidos sedimentables. Los análisis de DBO y DQO se realizaron por separado ya que los reactores crean condiciones distintas para cuantificarlos. El proceso inicia tomando dos viales de 20 ml y aforándolos con agua cruda, luego se colocan los viales en dos reactores distintos y se selecciona la opción de análisis de DQO para él un reactor y análisis de DBO para el otro. El análisis fue totalmente automático y duró entre dos a tres horas, una vez finalizado el análisis el reactor reportó los valores obtenidos en el panel digital. La relación DBO/ DQO proporcionó la información acerca de la biodegradabilidad del agua y los métodos para su tratamiento, estos pudieron ser biológicos, químicos o una combinación de ambos. Método 8000 ULR, LR, HR (HACH, 2016). Los resultados son reportados en la Tabla 3.

En el caso de sólidos disueltos, nitrógeno total, fosfatos, tensoactivos se emplearon medidores multiparámetros DR 900 marca HACH con acople a sondas digitales. Como se describe a continuación.

Para la evaluación de sólidos disueltos se realizaron análisis de conductividad eléctrica. Esto permitió conocer la cantidad de sales disueltas que poseía el agua y ayudó a tener en cuenta la remoción de estos agentes contaminantes mediante una etapa de coagulación – floculación. Los análisis se efectuaron colocando 100 ml de agua cruda en un vaso de precipitación. Los 100 ml de agua cruda fueron previamente tratados mediante un embudo de decantación y filtración con papel filtro, para que la muestra esté libre de sólidos sedimentables y sustancias no solubles en agua. Se colocaron sondas digitales acopladas en el medidor multiparámetro y se efectuaron los análisis eligiendo el parámetro a analizar en el panel digital. Estas mediciones se realizaron diariamente durante el periodo de 5 días al finalizar la jornada laboral (5:00 PM), debido a que a esta hora el tanque de encuentro de todos los efluentes recolecta toda el agua residual producida en el día. Método 8166 (HACH, 2016). Los datos se reportaron en la Tabla 4.

Para el caso de nitrógeno total, fosfatos y tensoactivos. Los análisis se efectuaron colocando 10 ml de agua cruda en los viales de análisis. Los 10 ml de agua cruda fueron previamente tratados mediante embudos de decantación y filtración con papel filtro, para que la muestra esté libre de sólidos sedimentables y sustancias no solubles en agua. Se colocaron los viales en el medidor multiparámetro y se efectuaron los análisis eligiendo el parámetro a analizar en el panel digital, los equipos estuvieron automatizados y se eligieron los tiempos de análisis, así como las condiciones de operación. Estas mediciones se realizaron diariamente durante el periodo de 5 días al finalizar la jornada laboral (5:00 PM), debido a que a esta hora el tanque de encuentro de todos los efluentes recolecta toda el agua residual producida en el día. Método 8192, 8007, 8028 (HACH, 2016). Los datos se reportaron en la Tabla 4.

**Tabla 4.**

*Evaluación de conductividad, nitrógeno total, fosfatos y tensoactivos. Tomados en el periodo de 5 días.*

| <b>Día</b> | <b>Conductividad eléctrica (uS/cm)</b> | <b>Nitrógeno total (mg/L)</b> | <b>Fosfatos totales (mg/L)</b> | <b>Tensoactivos (mg/L)</b> |
|------------|--|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 1          | 680                                    | 15                            | 5.17                           | 2,062                      |
| 2          | 522                                    | 10                            | 6.67                           | 1,875                      |
| 3          | 759                                    | 12                            | 5.38                           | 2,037                      |
| <b>Día</b> | <b>Conductividad eléctrica (uS/cm)</b> | <b>Nitrógeno total (mg/L)</b> | <b>Fosfatos totales (mg/L)</b> | <b>Tensoactivos (mg/L)</b> |
| 4          | 510                                    | 10                            | 3.74                           | 2,397                      |
| 5          | 580                                    | 13                            | 5.52                           | 1,823                      |

*Nota:* Datos obtenidos de la empresa Halliburton mediante equipos de monitoreo marca HACH con certificación ISO 9001.

En la evaluación de parámetros como metales pesados, hidrocarburos totales, fenoles, cloruros, etc. Dichos análisis se solicitaron a la empresa Halliburton, las muestras fueron tomadas en el punto de encuentro de todos los efluentes, los parámetros a ser analizados pertenecen al Acuerdo Ministerial N° 097-A, regulado por el municipio de la ciudad del Coca. Estos análisis sirvieron para implementar etapas que puedan remover los parámetros fuera de norma. Entre las que se analizaron: remoción química, filtros percoladores, striping, etc.

El análisis fue solicitado después de 5 días de recolección de los datos de diseño. Los datos solicitados se los reporta en la Tabla 5.

**Tabla 5.**

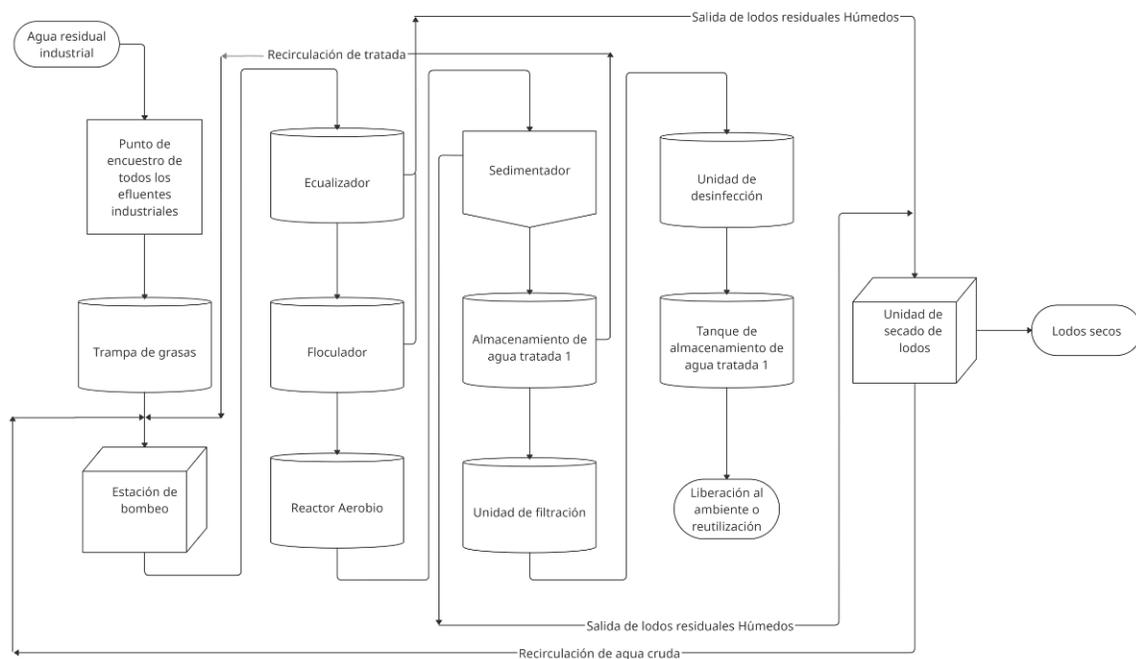
*Análisis solicitados a la empresa Halliburton conforme al Acuerdo Ministerial N° 097-A.*

| <b>Parámetros</b>     | <b>Expresado como</b>                  | <b>Unidad</b> | <b>Límite máximo permisible</b> | <b>Resultados</b> |
|-----------------------|--|---------------|---------------------------------|-------------------|
| Bario                 | Ba                                     | mg/L          | 2,0                             | <0,30             |
| Cadmio                | Cd                                     | mg/L          | 0,02                            | <0,02             |
| Cloruros              | Cl                                     | mg/L          | 1000                            | 122,42            |
| Cobre                 | Cu                                     | mg/L          | 1,0                             | <0,20             |
| Cromo total           | Cr                                     | mg/L          | 0,5                             | <0,05             |
| Fenoles               | Fenol                                  | mg/L          | 0,2                             | 1,175             |
| Mercurio total        | Hg                                     | mg/L          | 0,005                           | <0,002            |
| Níquel                | Ni                                     | mg/L          | 2,0                             | <0,10             |
| Oxígeno disuelto      | O                                      | mg/L          | **                              | 0,88              |
| Vanadio               | V                                      | mg/L          | **                              | <0,40             |
| Plomo                 | Pb                                     | mg/L          | 0,2                             | <0,15             |
| Potencial Hidrógeno   | pH                                     |               | 6-9                             | 8,23              |
| Sólidos totales       | ST                                     | mg/L          | 1600                            | 300,85            |
| Sulfatos              | SO4                                    | mg/L          | 1000                            | 94,17             |
| Hidrocarburos totales | TPH                                    | mg/L          | 20,0                            | 1480              |
| Tensoactivos          | Sustancias Activas al azul de metileno | mg/L          | 0,5                             | 2,152             |
| Zinc                  | Zn                                     | mg/L          | 5,0                             | 0,38              |

*Nota:* Datos obtenidos de la empresa Halliburton, realizados por la empresa LABSU, Acreditación N° OAE LE 2C 07-003, 2016.

### **3.4 Diseño del tren de tratamiento de aguas industriales**

El tren de tratamiento constituye un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos, que tienen por objetivo remover paulatinamente los contaminantes que el agua puede contener. En el diseño se incluyeron los diagramas del proceso en el cual se detallaron cada una de las etapas de tratamiento requeridas por el agua residual perteneciente a la empresa Halliburton, dichos diseños se desarrollaron a partir del estudio de los contaminantes presentes en el agua. Tal como se muestra en la Figura 4.

**Figura 4.***Tren de tratamiento de aguas industriales*

*Nota:* Diagrama de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales.

Mediante la evaluación de parámetros físicos evidenciados en la Tabla 2 referente a contenido de sólidos sedimentables y agentes contaminantes no solubles en el agua (grasas, aceites y petróleo), el proceso de saneamiento del agua residual industrial incluye un pretratamiento el cual tiene por objetivo eliminar dichos contaminantes. Debido a las características del flujo, el pretratamiento idóneo para este caso fue una trampa de grasas, dicha etapa proporcionó un efluente libre de sólidos sedimentables y agentes no solubles en agua. En comparación con otros métodos tales como: rejas, tamices, desarenadores y trampas API, son procesos mucho más costosos, de gran demandan espacio físico y con un tiempo de retención más elevado, la trampa de grasa diseñada e implementada por la empresa Peisol S.A fue la mejor

opción ya que posee un diseño ergonómico, compacto, de bajo costo y con un tiempo de retención bajo.

El tratamiento primario implantado, remueve sólidos coloidales, disueltos, metales pesados, ácidos y bases fuertes. En la elección del método de remoción de los contaminantes mencionados se analizaron datos previamente obtenidos tales como: pH, sólidos disueltos, conductividad eléctrica y metales pesados. La cantidad y concentración de estos parámetros ayudaron en la selección de la unidad idónea de tratamiento.

Para la remoción de dichos contaminantes se optó por unidades de coagulación y floculación (tratamiento químico). La etapa de coagulación se encargó de neutralizar iones presentes en el agua de tratamiento (sólidos coloidales, disueltos, sales y metales pesados) produciendo que estos se aglutinen, esto debido a la acción del agente químico (policloruro de aluminio). La floculación fue producida suministrando al flujo un agente químico floculante (pH - HACH), esto permitió que las partículas se aglutinen con mayor rapidez, facilitando de esta manera la sedimentación. Dichos químicos (policloruro de aluminio y pH - HACH) fueron suministrados mediante una bomba de dosificación y mezclados mediante un sistema de agitación mecánico.

Las dos etapas previas proporcionaron un flujo libre de sólidos sedimentables, grasas, aceites y petróleo. Además de un bajo contenido de metales pesados, conductividad eléctrica, sólidos coloidales y solubles. El flujo emergente de esta etapa presentó un pH que oscila en un rango de 6.8 – 7.6 (neutro).

El siguiente paso fue la remoción de carga orgánica que presentaba el agua de tratamiento, para esto se analizaron los valores de DBO obtenidos en la evaluación de los parámetros químicos, los cuales indicaron que se encontraban ligeramente fuera de

norma, para disminuir dicha carga orgánica se implantaron etapas que involucran reactores aerobios. Este proceso consistió en suministrar oxígeno al agua de tratamiento mediante la acción de compresores y difusores de burbuja, el oxígeno permitió activar bacterias aerobias, mismas que consumieron la carga orgánica presente. Se hizo dicha elección debido a que estos sistemas poseen eficiencias de remoción de hasta el 96% y solo produce lodos activos, los cuales pueden ser aprovechados como fertilizante. A diferencia de los sistemas anaerobios que poseen una eficiencia de hasta el 75 – 80 % y producen gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub> y metano), dichos sistemas son empleados en agua residuales con alto contenido de DBO, nitrógeno y fósforo. Generalmente agua proveniente de industrias alimenticias.

El agua efluente del reactor aerobio pasaba hasta la etapa de sedimentación, donde parte de los lodos activos producidos en la etapa previa eran recirculados y otra parte fueron sedimentados. La técnica de sedimentación constaba de una piscina cónica dotada de un sistema de tuberías que permitieron la recirculación del flujo, dicha etapa operaba mediante la acción de compresores y válvulas de control. El sistema fue desarrollado e implantado por los técnicos de la empresa Peisol S.A.

Los lodos producidos en etapas previas fueron evacuados hasta la cámara de secado de lodos, mediante bombas industriales sumergibles. Dichas cámaras estaban dotadas de medios filtrantes de distinta granulometría, mismos impidieron el paso de los sólidos y permitieron permeabilizar el agua contenida en los lodos. El agua efluente de esta etapa fue recirculada hasta la estación de bombeo. Este sistema fue conservado de la planta de tratamiento antigua ya que se encontraba en perfectas condiciones de operación.

El agua proveniente del sedimentador poseía propiedades como: inoloro, incoloro, pH neutro, niveles bajos de DQO, DBO y sólidos solubles. A partir de este

punto del proceso el agua fue denominada como “agua tratada” y pasaba a una etapa de almacenamiento en la que podía ser enviada hasta la estación de bombeo si el agua residual presenta excesivos niveles de DBO, DQO, sólidos solubles, acidez y basicidad o también podría ser enviada hacia la unidad de filtración donde era sometida a filtros de carbón activado con la finalidad de remover metales pesados, tensoactivos y bacterias.

Seguidamente el agua tratada fue sometida a un proceso de desinfección en el cual se empleó hipoclorito de sodio, mediante bombas de dosificación. Se empleó este método ya que es económico, efectivo y fácil de operar. A diferencia de otros métodos como la ozonificación o el empleo de luz ultravioleta, que son efectivos, pero de alta demanda económica.

Finalmente, el proceso de tratamiento terminó en un tanque de almacenamiento de agua final en el cual pudo ser reutilizado para lavado de equipos de perforación de pozos, automóviles, camiones, sistemas móviles de producción de diésel y también fue liberado al medio ambiente sin causar ninguna clase de impacto ambiental.

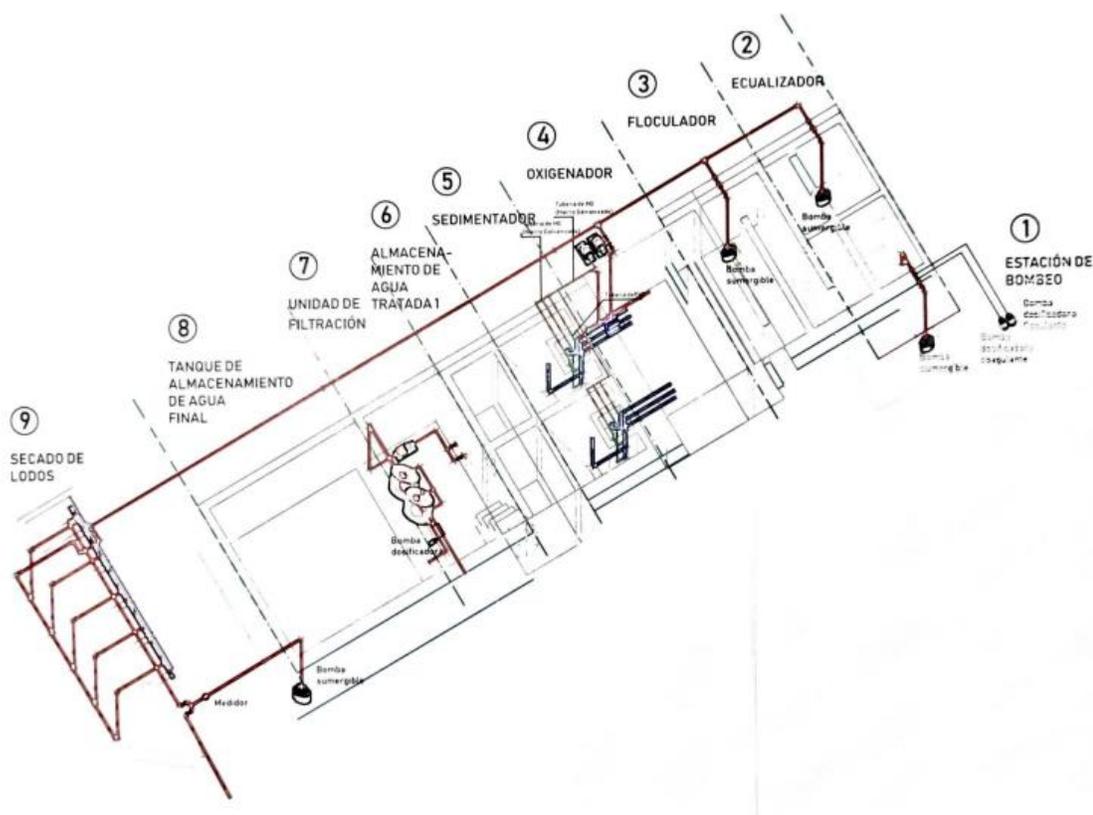
### **3.5 Construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales**

El tren de tratamiento diseñado fue presentado al personal técnico de la empresa Peisol S.A, mediante un informe en el que se detalló el diagrama flujo del proceso. Una vez aprobada la propuesta de planta de tratamiento de aguas industriales, el personal de obra civil de la empresa Peisol S.A procedió con el dimensionamiento y construcción de la obra, con base en los requerimientos de la empresa Halliburton. La construcción tuvo una duración de tres meses en el cual se utilizó el espacio físico que ocupaba la anterior planta de tratamiento. Los planos de construcción son de uso exclusivo de la empresa Halliburton y Peisol S.A. Por dicho motivo se presenta una

imagen del diseño hidráulico, tuberías, bombas y válvulas. Como se muestra en el Anexo 3 y la Figura 5.

### Figura 5.

*Diseño hidráulico, tuberías, bombas y válvulas.*



*Nota:* El presente diagrama fue desarrollado por el personal de obra civil de la empresa Peisol S.A y dispone del uso de una copia para el actual documento (Peisol, 2017).

### 3.6 Arranque de la planta

El arranque de la planta se efectuó durante el periodo de un mes con horarios de trabajo de 8:00 AM a 5:00 PM de lunes a domingo. Cumpliendo con todas las medidas laborales vigentes en la empresa Halliburton. Este periodo de trabajo tuvo como objetivo

ajustar parámetros de operación y capacitar al personal técnico que estará encargado del manejo de la planta.

Para garantizar el correcto funcionamiento de la planta y el cumplimiento de la normativa ambiental vigente, se solicitó a la empresa Halliburton la toma de muestras para su respectivo análisis de laboratorio, basados en el Acuerdo Ministerial N° 097-A, 2015. Dicho análisis fue realizado por un ente certificado por la SAE. Dichos análisis se realizaron cada semana durante el periodo de un mes y únicamente al agua tratada.

El análisis semanal se realizó para garantizar el correcto desempeño de la planta y en el caso de que los parámetros se encontrasen fuera de norma realizar los ajustes necesarios para estabilizarlos. La empresa Peisol S.A brindó el periodo de un mes de operación de la planta para que el beneficiario pueda evidenciar que la planta adquirida cumple con todos sus requerimientos.

El inicio de operaciones arrancó con la verificación del sistema eléctrico e hidráulico en conjunto con el personal técnico de la empresa Peisol S.A. Se inició activando la bomba ubicada en el punto de encuentro de todos los efluentes, haciendo pasar 1,5 metros cúbicos a razón de 10 litros por segundo hasta la primera etapa (trampa de grasas) en donde fueron retenidos contaminantes como sólidos sedimentables, grasas, combustibles, aceites y petróleo.

El flujo de proceso continuó hasta la estación de bombeo por la acción de la gravedad, en este punto se tomaron muestras, las mismas que fueron sometidas a pruebas de jarra. El Proceso consistió en aforar cuatro vasos de precipitación de 1000 ml en los cuales se añadió diferentes volúmenes de coagulante (policloruro de aluminio) con la ayuda de una pipeta, posteriormente se homogeneizó la muestra con una varilla

de vidrio durante un periodo de 30 segundos, se registró el tiempo de sedimentación y efectos en el pH. Los datos se reportan en la Tabla 6 y se ilustran en el Anexo 4.

Para una dosificación más eficiente del coagulante se volvió a realizar la prueba de jarra disminuyendo el volumen de dosificación en valores más cercanos a 1 ml de coagulante añadido. Los datos se reportan en la Tabla 7.

Se encontró el punto óptimo de dosificación se regularon las bombas de dosificación y succión a una razón de 1,2 ml de coagulante por cada litro de agua cruda, se envió la mezcla a la etapa de coagulación y floculación.

**Tabla 6.**

*Datos obtenidos de la prueba de jarras*

| <b>Muestra</b> | <b>Coagulante añadido (ml)</b> | <b>Tiempo de sedimentación (min)</b> | <b>pH</b> |
|----------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------|
| 1              | 0,5                            | 5                                    | 8,2       |
| 2              | 1,0                            | 2                                    | 7,5       |
| 3              | 1,5                            | No sedimenta                         | 7,2       |
| 4              | 2,0                            | No sedimenta                         | 6,8       |

*Nota:* Datos obtenidos del arranque de operación de la PTAR.

**Tabla 7.**

*Datos obtenidos de la segunda prueba de jarras*

| <b>Muestra</b> | <b>Coagulante añadido (ml)</b> | <b>Tiempo de sedimentación (min)</b> | <b>pH</b> |
|----------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------|
| 1              | 0,75                           | 3,2                                  | 8,0       |
| 2              | 1,0                            | 2                                    | 7,5       |
| 3              | 1,1                            | 1,8                                  | 7,4       |
| 4              | 1,2                            | 1,2                                  | 7,3       |
| 5              | 1,25                           | No sedimenta                         | 7,0       |

*Nota:* Datos obtenidos del arranque de operación de la PTAR.

En esta etapa se observó una separación de fase acorde a los diseños antes previstos. Se envió 4 metros cúbicos de agua cruda desde el punto de encuentro de todos los efluentes hasta la etapa consecutiva con el objetivo de llenar el reactor biológico. Este proceso duró aproximadamente 2 días y medio, debido a la producción diaria de agua residual industrial.

Una vez lleno el reactor biológico se encendieron los compresores y se suministró un kilo gramos de bacterias anaerobias previamente activadas. Las bacterias son de procedencia mexicana y la empresa Peisol S.A se reserva toda la información. Las bacterias empezaron a reproducirse en el lapso de cuatro horas creando con esto producción de lodos activos, mismos que fueron un claro indicativo de que la materia orgánica presente en el agua cruda estaba siendo consumida. Las condiciones para que el reactor biológico opere eficientemente es a un rango de pH de 6,5 – 8,5, en ausencia de aceite, cloro, grasa, petróleo y temperaturas no mayores a 35°C. Los parámetros como pH y cloro fueron evaluados en la etapa de coagulación – floculación, realizando 3 mediciones en distintos puntos de la etapa, siguiendo el mismo procedimiento que se realizó en la evaluación de los parámetros químicos. Los datos se reportan en la Tabla 8.

**Tabla 8.**

*Datos de pH y cloro en la etapa de coagulación – floculación*

| <b>Muestra</b> | <b>pH</b> | <b>Cloro (mg/L)</b> |
|----------------|-----------|---------------------|
| 1              | 7,3       | 0,02                |
| 2              | 7,3       | 0,02                |
| 3              | 7,3       | 0,02                |

*Nota:* Datos obtenidos del arranque de operación de la PTAR.

Verificadas las condiciones de operación se suministró diariamente 1,8 metros cúbicos de agua cruda provenientes desde el punto de encuentro de todos los efluentes hasta la primera etapa (trampa de grasas).

El proceso continuo y se puso en accionamiento la etapa de sedimentación en la que en primera instancia no se activó el sistema de refluo debido a que la producción de lodos activos no era considerable. El agua de tratamiento efluente de esta etapa poseía propiedades como: inoloro, incoloro, pH neutro, niveles bajos de sólidos solubles. Para la evaluación de estos parámetros se siguieron los procedimientos realizados en la evaluación de los parámetros químicos, perteneciente a la obtención de datos de diseño. Se tomaron tres muestras en diferentes puntos de la etapa, esto para descartar contaminación cruzada. Las características pueden ser evidenciadas en los datos reportados en la Tabla 9.

El proceso siguió sin ninguna novedad durante el llenado del almacenamiento de agua tratada 1. El agua de dicho proceso fue utilizada para lavar los filtros de carbón activado, esta etapa estaba dotada de dos filtros industriales de carbón activado con volúmenes de 0,65 metros cúbicos, mismos que filtran agua a razón de 4,5 litros por segundo. El efluente de dicho lavado fue recirculado hasta la estación de bombeo.

**Tabla 9.**

*Datos de pH y sólidos solubles realizado en la etapa de almacenamiento de agua tratada 1.*

| <b>Muestra</b> | <b>pH</b> | <b>Sólidos sedimentables<br/>(mg/L)</b> |
|----------------|-----------|---|
| 1              | 7,2       | 125                                     |
| 2              | 7,2       | 125                                     |
| 3              | 7,2       | 125                                     |

*Nota:* Datos obtenidos del arranque de operación de la PTAR.

Conectado en serie se encuentran las unidades de desinfección por hipoclorito de calcio, en donde dicho agente desinfectante fue suministrado mediante bombas de dosificación. Para poder regular la dosificación de la bomba se tomaron 1000 ml de agua tratada y se añadió pequeños volúmenes de hipoclorito de calcio con la ayuda de una pipeta, con el objetivo de desinfectar el agua y tener una concentración de cloro libre residual no mayor 1,5 mg/L, concentración demandada en la norma INEN 1108. Para la evaluación de cloro libre residual se siguió el procedimiento realizado en la evaluación de los parámetros químicos, perteneciente a la obtención de datos de diseño. Los datos son presentados en la Tabla 10.

La dosificación tomada para la desinfección fue de 1,25 mililitros de hipoclorito de calcio por cada litro de agua tratada, se reguló la bomba de dosificación a esta razón y se procedió a enviar el agua tratada a el tanque de almacenamiento de agua final. Como se ilustra en el Anexo 5.

**Tabla 10.**

*Dosificación de hipoclorito de calcio.*

| <b>Muestra</b> | <b>Hipoclorito de calcio<br/>añadido (ml)</b> | <b>Concentración de cloro<br/>residual (mg/L)</b> |
|----------------|---|---|
| 1              | 0,50  | 0,00  |
| 2              | 0,75  | 0,39  |
| 3              | 1,00  | 1,02  |
| 4              | 1,25  | 1,12  |
| 5              | 1,50  | 2,10  |

*Nota:* Datos obtenidos del arranque de operación de la PTAR.

## 4 Resultados y discusión

### 4.1 Análisis del agua tratada

Se realizó una prueba de hipótesis de la media con respecto a los límites de descarga permisibles. Con un nivel de significancia del 0.05.

La prueba de hipótesis consideró la media de las cuatro mediciones en el periodo de un mes de cada uno de los parámetros, con respecto a los valores específicos de su correspondiente valor de límite de descarga permisible. Se adoptó como hipótesis nula “El valor del parámetro X es igual que su respectivo límite de descarga permisible Y” y como hipótesis alternativa “El valor del parámetro X es menor que su respectivo límite de descarga permisible Y”. Pudiendo ser “X” cada uno de los parámetros y “Y” su respectivo valor de límite de descarga permisible. Cada parámetro analizado durante el periodo de un mes fue reportado en la Tabla 11.

Tabla 11.

*Datos obtenidos del análisis de agua tratada durante el periodo de un mes de evaluación.*

| Parámetros                    | Expresado como                         | Unidad | Límite máximo permisible | Semana 1 | Semana 2 | Semana 3    | Semana 4 |
|-------------------------------|--|--------|--------------------------|----------|----------|-------------|----------|
| Bario                         | Ba                                     | mg/L   | 2,0                      | 0,30     | 0,18     | 0,42        | 0,27     |
| Cadmio                        | Cd                                     | mg/L   | 0,02                     | 0,01     | 0,01     | 0,01        | 0,01     |
| Nitrógeno Amoniacal           | N                                      | mg/L   | 30,0                     | 1,12     | 5,89     | 2,37        | 2,81     |
| Cloruros                      | Cl                                     | mg/L   | 1000                     | 381,41   | 420,18   | 453,23      | 356,12   |
| Cobre                         | Cu                                     | mg/L   | 1,0                      | 0,20     | 0,12     | 0,46        | 0,28     |
| Cromo total                   | Cr                                     | mg/L   | 0,5                      | 0,10     | 0,21     | 0,12        | 0,10     |
| Demanda bioquímica de oxígeno | DBO5                                   | mg/L   | 100                      | 30,00    | 23,00    | 18,00       | 12,00    |
| Fenoles                       | Fenol                                  | mg/L   | 0,2                      | 0,05     | 0,05     | 0,1         | 0,07     |
| Mercurio total                | Hg                                     | mg/L   | 0,005                    | 0,002    | 0,002    | 0,002       | 0,002    |
| Parámetros                    | Expresado como                         | Unidad | Límite máximo permisible | Semana 1 | Semana 2 | Semana 3    | Semana 4 |
| Níquel                        | Ni                                     | mg/L   | 2,0                      | 0,10     | 0,09     | 0,09        | 0,16     |
| Oxígeno disuelto              | O                                      | mg/L   | **                       | 6,20     | 8,12     | 5,12        | 7,89     |
| Demanda química de oxígeno    | DQO                                    | mg/L   | 200                      | 120      | 98       | 180         | 112      |
| Vanadio                       | V                                      | mg/L   | **                       | 0,40     | 0,29     | 0,47        | 0,32     |
| Plomo                         | Pb                                     | mg/L   | 0,2                      | 0,15     | 0,12     | 0,16        | 0,10     |
| Potencial Hidrógeno           | pH                                     |        | 6-9                      | 6.83     | 6.59     | 6,30        | 7,2      |
| Sólidos totales               | ST                                     | mg/L   | 1600                     | 910,51   | 945,16   | 1120,83     | 830,97   |
| Sulfatos                      | SO4                                    | mg/L   | 1000                     | 46,00    | 57,19    | 112,03      | 52,18    |
| Hidrocarburos totales         | TPH                                    | mg/L   | 20,0                     | 1,20     | 1,18     | 2,30        | 2,21     |
| Tensoactivos                  | Sustancias Activas al azul de metileno | mg/L   | 0,5                      | 0,31     | 0,15     | <b>0,61</b> | 0,22     |
| Zinc                          | Zn                                     | mg/L   | 5,0                      | 0,05     | 0,05     | 0,08        | 0,06     |

*Nota:* Datos proporcionados por empresa Halliburton.

#### 4.1.1 Prueba de hipótesis para Bario

El Acuerdo Ministerial N° 097- A para límites de descarga a un cuerpo de agua dulce impone un límite máximo permisible de 2,0 mg/L para el Bario. Se tomaron 4 muestras de agua tratada durante el periodo de un mes y se analizó por medio de un laboratorio particular acreditado por la SAE, obteniendo como promedio 0,29 mg/L con una desviación estándar de 0.09 mg/L. Se comprobó que la hipótesis del promedio teórico igual a 2,0 mg/L en contraposición a la hipótesis alternativa de que es menor a 2,0 mg/L en el nivel de significancia del 5%.

$$n = 4$$

$$\text{Media muestral } (\bar{X}): \bar{X} = 0,29 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis nula (Ho): } Ho: u = 2,0 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis alternativa (H1): } H1: u < 2,0 \text{ mg/L}$$

$$\text{Nivel de significancia } (\alpha): \alpha = 5 \%$$

$$\text{Desviación estándar (s): } s = 0,09 \text{ mg/L}$$

$$t \text{ tabulado (t}_t\text{): } t_t = - 2,353$$

$$t \text{ calculado (t}_c\text{): } t_c = - 38$$

En este caso  $|t_t| < |t_c|$ : Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (H1). Se puede afirmar que el valor promedio analizado para el Bario, no excede el límite de descarga permisible impuesto por el Acuerdo Ministerial N° 097-A.

#### 4.1.2 Prueba de hipótesis para Cadmio

El Acuerdo Ministerial N° 097- A para límites de descarga a un cuerpo de agua dulce impone un límite máximo permisible de 0,02 mg/L para el Cadmio. Se tomaron 4 muestras de agua tratada durante el periodo de un mes y se analizó por medio de un laboratorio particular acreditado por la SAE, obteniendo como promedio 0,009 mg/L con una desviación estándar de 0.003 mg/L. Se comprobó que la hipótesis del promedio teórico igual a 0.02 mg/L en contraposición a la hipótesis alternativa de que es menor a 0.02 mg/L en el nivel de significancia del 5%.

$$n = 4$$

$$\text{Media muestral } (\bar{X}): \bar{X} = 0,009 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis nula (Ho): } Ho: u = 0,02 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis alternativa (H1): } H1: u < 0,02 \text{ mg/L}$$

$$\text{Nivel de significancia } (\alpha): \alpha = 5 \%$$

$$\text{Desviación estándar (s): } s = 0,003 \text{ ml/L}$$

$$t \text{ tabulado (tt): } tt = - 2,353$$

$$t \text{ calculado (tc): } tc = - 7,33$$

En este caso  $|tt| < |tc|$ : Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (H1). Se puede afirmar que el valor promedio analizado para el Cadmio, no excede el límite de descarga permisible impuesto por el Acuerdo Ministerial N° 097- A.

#### **4.1.3 Prueba de hipótesis para el Nitrógeno Amoniacal.**

El Acuerdo Ministerial N° 097-A para límites de descarga a un cuerpo de agua dulce impone un límite máximo permisible de 30 mg/L para el Nitrógeno Amoniacal. Se tomaron 4 muestras de agua tratada durante el periodo de un mes y se analizó por medio de un laboratorio particular acreditado por la SAE, obteniendo como promedio 3,048 mg/L con una desviación estándar de 0,975 mg/L. Se comprobó que la hipótesis del promedio teórico igual a 30 mg/L en contraposición a la hipótesis alternativa de que es menor a 30 mg/L en el nivel de significancia del 5%.

$$n = 4$$

$$\text{Media muestral } (\bar{X}): \bar{X} = 3,048 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis nula (Ho): Ho: } u = 30 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis alternativa (H1): H1: } u < 30 \text{ mg/L}$$

$$\text{Nivel de significancia } (\alpha): \alpha = 5 \%$$

$$\text{Desviación estándar (s): } s = 0,975 \text{ ml/L}$$

$$\text{t tabulado (tt): } tt = - 2,353$$

$$\text{t calculado (tc): } tc = - 55,28$$

En este caso  $|tt| < |tc|$ : Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (H1). Se puede afirmar que el valor promedio analizado para el Nitrógeno Amoniacal, no excede el límite de descarga permisible impuesto por el Acuerdo Ministerial N° 097-A.

#### 4.1.4 Prueba de hipótesis para Cloruros.

El Acuerdo Ministerial N° 097-A para límites de descarga a un cuerpo de agua dulce impone un límite máximo permisible de 1000 mg/L para el Cloruros. Se tomaron 4 muestras de agua tratada durante el periodo de un mes y se analizó por medio de un laboratorio particular acreditado por la SAE, obteniendo como promedio 402, 735 mg/L con una desviación estándar de 128,875 mg/L. Se comprobó que la hipótesis del promedio teórico igual a 1000 mg/L en contraposición a la hipótesis alternativa de que es menor a 1000 mg/L en el nivel de significancia del 5%.

$$n = 4$$

$$\text{Media muestral } (\bar{X}): \bar{X} = 402,735 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis nula (Ho): Ho: } u = 1000 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis alternativa (H1): H1: } u < 1000 \text{ mg/L}$$

$$\text{Nivel de significancia } (\alpha): \alpha = 5 \%$$

$$\text{Desviación estándar (s): } s = 128,875 \text{ ml/L}$$

$$\text{t tabulado (tt): } tt = - 2,353$$

$$\text{t calculado (tc): } tc = - 9,27$$

En este caso  $|tt| < |tc|$ : Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (H1). Se puede afirmar que el valor promedio analizado para Cloruros, no excede el límite de descarga permisible impuesto por el Acuerdo Ministerial N° 097-A.

#### 4.1.5 Prueba de hipótesis para Cobre.

El Acuerdo Ministerial N° 097-A para límites de descarga a un cuerpo de agua dulce impone un límite máximo permisible de 1 mg/L para el Cobre. Se tomaron 4 muestras de agua tratada durante el periodo de un mes y se analizó por medio de un laboratorio particular acreditado por la SAE, obteniendo como promedio de 0.265 mg/L con una desviación estándar de 0,085 mg/L. Se comprobó que la hipótesis del promedio teórico igual a 1 mg/L en contraposición a la hipótesis alternativa de que es menor a 1 mg/L en el nivel de significancia del 5%.

$$n = 4$$

$$\text{Media muestral } (\bar{X}): \bar{X} = 0,265 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis nula (Ho): } Ho: u = 1 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis alternativa (H1): } H1: u < 1 \text{ mg/L}$$

$$\text{Nivel de significancia } (\alpha): \alpha = 5 \%$$

$$\text{Desviación estándar (s): } s = 0,085 \text{ ml/L}$$

$$t \text{ tabulado (tt): } tt = - 2,353$$

$$t \text{ calculado (tc): } tc = - 17,33$$

En este caso  $|tt| < |tc|$ : Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (H1). Se puede afirmar que el valor promedio analizado para Cobre, no excede el límite de descarga permisible impuesto por el Acuerdo Ministerial N° 097-A.

#### 4.1.6 Prueba de hipótesis para Cromo total.

El Acuerdo Ministerial N° 097-A para límites de descarga a un cuerpo de agua dulce impone un límite máximo permisible de 0,5 mg/L para el Cromo total. Se tomaron 4 muestras de agua tratada durante el periodo de un mes y se analizó por medio de un laboratorio particular acreditado por la SAE, obteniendo como promedio de 0,133 mg/L con una desviación estándar de 0,042 mg/L. Se comprobó que la hipótesis del promedio teórico igual a 0,5 mg/L en contraposición a la hipótesis alternativa de que es menor a 0,5 mg/L en el nivel de significancia del 5%.

$$n = 4$$

$$\text{Media muestral } (\bar{X}): \bar{X} = 0,133 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis nula (Ho): } Ho: u = 0,5 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis alternativa (H1): } H1: u < 0,5 \text{ mg/L}$$

$$\text{Nivel de significancia } (\alpha): \alpha = 5 \%$$

$$\text{Desviación estándar (s): } s = 0,042 \text{ mg/L}$$

$$t \text{ tabulado (tt): } tt = - 2,353$$

$$t \text{ calculado (tc): } tc = - 17,33$$

En este caso  $|tt| < |tc|$ : Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (H1). Se puede afirmar que el valor promedio analizado para Cromo total, no excede el límite de descarga permisible impuesto por el Acuerdo Ministerial N° 097-A.

#### **4.1.7 Prueba de hipótesis para Demanda bioquímica de oxígeno.**

El Acuerdo Ministerial N° 097-A para límites de descarga a un cuerpo de agua dulce impone un límite máximo permisible de 100 mg/L para el Demanda bioquímica de oxígeno. Se tomaron 4 muestras de agua tratada durante el periodo de un mes y se analizó por medio de un laboratorio particular acreditado por la SAE, obteniendo como promedio 20,750 mg/L con una desviación estándar de 1,453 mg/L. Se comprobó que la hipótesis del promedio teórico igual a 100 mg/L en contraposición a la hipótesis alternativa de que es menor a 100 mg/L en el nivel de significancia del 5%.

$$n = 4$$

$$\text{Media muestral } (\bar{X}): \bar{X} = 20,75 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis nula (Ho): } Ho: u = 100 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis alternativa (H1): } H1: u < 100 \text{ mg/L}$$

$$\text{Nivel de significancia } (\alpha): \alpha = 5 \%$$

$$\text{Desviación estándar (s): } s = 1,453 \text{ ml/L}$$

$$t \text{ tabulado (tt): } tt = - 2,353$$

$$t \text{ calculado (tc): } tc = - 109,12$$

En este caso  $|tt| < |tc|$ : Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (H1). Se puede afirmar que el valor promedio analizado para Demanda bioquímica de oxígeno, no excede el límite de descarga permisible impuesto por el Acuerdo Ministerial N° 097-A.

#### 4.1.8 Prueba de hipótesis para Fenoles.

El Acuerdo Ministerial N° 097-A para límites de descarga a un cuerpo de agua dulce impone un límite máximo permisible de 0,2 mg/L para Fenoles. Se tomaron 4 muestras de agua tratada durante el periodo de un mes y se analizó por medio de un laboratorio particular acreditado por la SAE, obteniendo como promedio 0,07 mg/L con una desviación estándar de 0,012 mg/L. Se comprobó que la hipótesis del promedio teórico igual a 0,2 mg/L en contraposición a la hipótesis alternativa de que es menor a 0,2 mg/L en el nivel de significancia del 5%.

$$n = 4$$

$$\text{Media muestral } (\bar{X}): \bar{X} = 0,07 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis nula (Ho): } Ho: u = 0,2 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis alternativa (H1): } H1: u < 0,2 \text{ mg/L}$$

$$\text{Nivel de significancia } (\alpha): \alpha = 5 \%$$

$$\text{Desviación estándar (s): } s = 0,012 \text{ mg/L}$$

$$t \text{ tabulado (tt): } tt = - 2,353$$

$$t \text{ calculado (tc): } tc = - 21,85$$

En este caso  $|tt| < |tc|$ : Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (H1). Se puede afirmar que el valor promedio analizado para Fenoles, no excede el límite de descarga permisible impuesto por el Acuerdo Ministerial N° 097-A.

#### **4.1.9 Prueba de hipótesis para Mercurio total.**

El Acuerdo Ministerial N° 097-A para límites de descarga a un cuerpo de agua dulce impone un límite máximo permisible de 0,005 mg/L para Mercurio total. Se tomaron 4 muestras de agua tratada durante el periodo de un mes y se analizó por medio de un laboratorio particular acreditado por la SAE, obteniendo como promedio 0,00175 mg/L con una desviación estándar de 0,0003 mg/L. Se comprobó que la hipótesis del promedio teórico igual a 0,005 mg/L en contraposición a la hipótesis alternativa de que es menor a 0,005 mg/L en el nivel de significancia del 5%.

$$n = 4$$

$$\text{Media muestral } (\bar{X}): \bar{X} = 0,00175 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis nula (Ho): Ho: } u = 0,005 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis alternativa (H1): H1: } u < 0,005 \text{ mg/L}$$

$$\text{Nivel de significancia } (\alpha): \alpha = 5 \%$$

$$\text{Desviación estándar (s): } s = 0,00042 \text{ ml/L}$$

$$\text{t tabulado (tt): } tt = - 2,353$$

$$\text{t calculado (tc): } tc = - 15,48$$

En este caso  $|tt| < |tc|$ : Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (H1). Se puede afirmar que el valor promedio analizado para Mercurio total, no excede el límite de descarga permisible impuesto por el Acuerdo Ministerial N° 097-A.

#### **4.1.10 Prueba de hipótesis para Níquel.**

El Acuerdo Ministerial N° 097-A para límites de descarga a un cuerpo de agua dulce impone un límite máximo permisible de 2 mg/L para Níquel. Se tomaron 4 muestras de agua tratada durante el periodo de un mes y se analizó por medio de un laboratorio particular acreditado por la SAE, obteniendo como promedio 0,11 mg/L con una desviación estándar de 0,0264 mg/L. Se comprobó que la hipótesis del promedio teórico igual a 2 mg/L en contraposición a la hipótesis alternativa de que es menor a 2 mg/L en el nivel de significancia del 5%.

$$n = 4$$

$$\text{Media muestral } (\bar{X}): \bar{X} = 0,11 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis nula (Ho): } Ho: u = 2 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis alternativa (H1): } H1: u < 2 \text{ mg/L}$$

$$\text{Nivel de significancia } (\alpha): \alpha = 5 \%$$

$$\text{Desviación estándar (s): } s = 0,0264 \text{ mg/L}$$

$$t \text{ tabulado (tt): } tt = - 2,353$$

$$t \text{ calculado (tc): } tc = - 143,18$$

En este caso  $|tt| < |tc|$ : Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (H1). Se puede afirmar que el valor promedio analizado para Níquel, no excede el límite de descarga permisible impuesto por el Acuerdo Ministerial N° 097-A.

#### **4.1.11 Prueba de hipótesis para Demanda química de oxígeno.**

El Acuerdo Ministerial N° 097-A para límites de descarga a un cuerpo de agua dulce impone un límite máximo permisible de 200 mg/L para Demanda química de oxígeno. Se tomaron 4 muestras de agua tratada durante el periodo de un mes y se analizó por medio de un laboratorio particular acreditado por la SAE, obteniendo como promedio 127,5 mg/L con una desviación estándar de 8,925 mg/L. Se comprobó que la hipótesis del promedio teórico igual a 200 mg/L en contraposición a la hipótesis alternativa de que es menor a 200 mg/L en el nivel de significancia del 5%.

$$n = 4$$

$$\text{Media muestral } (\bar{X}): \bar{X} = 127,5 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis nula (Ho): } Ho: u = 200 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis alternativa (H1): } H1: u < 200 \text{ mg/L}$$

$$\text{Nivel de significancia } (\alpha): \alpha = 5 \%$$

$$\text{Desviación estándar (s): } s = 8,925 \text{ mg/L}$$

$$t \text{ tabulado (tt): } tt = - 2,353$$

$$t \text{ calculado (tc): } tc = - 16,25$$

En este caso  $|tt| < |tc|$ : Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (H1). Se puede afirmar que el valor promedio analizado para Demanda química de oxígeno, no excede el límite de descarga permisible impuesto por el Acuerdo Ministerial N° 097-A.

#### 4.1.12 Prueba de hipótesis para Plomo.

El Acuerdo Ministerial N° 097-A para límites de descarga a un cuerpo de agua dulce impone un límite máximo permisible de 0,2 mg/L para Plomo. Se tomaron 4 muestras de agua tratada durante el periodo de un mes y se analizó por medio de un laboratorio particular acreditado por la SAE, obteniendo como promedio 0,1325 mg/L con una desviación estándar de 0,03975 mg/L. Se comprobó que la hipótesis del promedio teórico igual a 0,2 mg/L en contraposición a la hipótesis alternativa de que es menor a 0,2 mg/L en el nivel de significancia del 5%.

$$n = 4$$

$$\text{Media muestral } (\bar{X}): \bar{X} = 0,1325 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis nula (Ho): } Ho: u = 0,2 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis alternativa (H1): } H1: u < 0,2 \text{ mg/L}$$

$$\text{Nivel de significancia } (\alpha): \alpha = 5 \%$$

$$\text{Desviación estándar (s): } s = 0,03975 \text{ mg/L}$$

$$t \text{ tabulado (tt): } tt = - 2,353$$

$$t \text{ calculado (tc): } tc = - 3,40$$

En este caso  $|tt| < |tc|$ : Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (H1). Se puede afirmar que el valor promedio analizado para Plomo, no excede el límite de descarga permisible impuesto por el Acuerdo Ministerial N° 097-A.

#### **4.1.13 Prueba de hipótesis para Sólidos totales.**

El Acuerdo Ministerial N° 097-A para límites de descarga a un cuerpo de agua dulce impone un límite máximo permisible de 1600 mg/L para Sólidos totales. Se tomaron 4 muestras de agua tratada durante el periodo de un mes y se analizó por medio de un laboratorio particular acreditado por la SAE, obteniendo como promedio 951,87 mg/L con una desviación estándar de 95,19 mg/L. Se comprobó que la hipótesis del promedio teórico igual a 1600 mg/L en contraposición a la hipótesis alternativa de que es menor a 1600 mg/L en el nivel de significancia del 5%.

$$n = 4$$

$$\text{Media muestral } (\bar{X}): \bar{X} = 951,87 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis nula (Ho): } Ho: u = 1600 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis alternativa (H1): } H1: u < 1600 \text{ mg/L}$$

$$\text{Nivel de significancia } (\alpha): \alpha = 5 \%$$

$$\text{Desviación estándar (s): } s = 95,19 \text{ mg/L}$$

$$t \text{ tabulado (tt): } tt = - 2,353$$

$$t \text{ calculado (tc): } tc = - 13,62$$

En este caso  $|tt| < |tc|$ : Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (H1). Se puede afirmar que el valor promedio analizado para Sólidos totales, no excede el límite de descarga permisible impuesto por el Acuerdo Ministerial N° 097-A.

#### **4.1.14 Prueba de hipótesis para Sulfatos.**

El Acuerdo Ministerial N° 097-A para límites de descarga a un cuerpo de agua dulce impone un límite máximo permisible de 1000 mg/L para Sulfatos. Se tomaron 4 muestras de agua tratada durante el periodo de un mes y se analizó por medio de un laboratorio particular acreditado por la SAE, obteniendo como promedio 66,85 mg/L con una desviación estándar de 5,35 mg/L. Se comprobó que la hipótesis del promedio teórico igual a 1000 mg/L en contraposición a la hipótesis alternativa de que es menor a 1000 mg/L en el nivel de significancia del 5%.

$$n = 4$$

$$\text{Media muestral } (\bar{X}): \bar{X} = 66,85 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis nula (Ho): } Ho: u = 1000 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis alternativa (H1): } H1: u < 1000 \text{ mg/L}$$

$$\text{Nivel de significancia } (\alpha): \alpha = 5 \%$$

$$\text{Desviación estándar (s): } s = 5,35 \text{ ml/L}$$

$$t \text{ tabulado (tt): } tt = - 2,353$$

$$t \text{ calculado (tc): } tc = - 348,97$$

En este caso  $|tt| < |tc|$ : Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (H1). Se puede afirmar que el valor promedio analizado para Sulfatos, no excede el límite de descarga permisible impuesto por el Acuerdo Ministerial N° 097-A.

#### **4.1.15 Prueba de hipótesis para Hidrocarburos totales.**

El Acuerdo Ministerial N° 097-A para límites de descarga a un cuerpo de agua dulce impone un límite máximo permisible de 20 mg/L para Hidrocarburos totales. Se tomaron 4 muestras de agua tratada durante el periodo de un mes y se analizó por medio de un laboratorio particular acreditado por la SAE, obteniendo como promedio 1,72 mg/L con una desviación estándar de 0,53 mg/L. Se comprobó que la hipótesis del promedio teórico igual a 20 mg/L en contraposición a la hipótesis alternativa de que es menor a 20 mg/L en el nivel de significancia del 5%.

$$n = 4$$

$$\text{Media muestral } (\bar{X}): \bar{X} = 1,72 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis nula (Ho): } Ho: u = 20 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis alternativa (H1): } H1: u < 20 \text{ mg/L}$$

$$\text{Nivel de significancia } (\alpha): \alpha = 5 \%$$

$$\text{Desviación estándar (s): } s = 0,53 \text{ mg/L}$$

$$t \text{ tabulado (tt): } tt = - 2,353$$

$$t \text{ calculado (tc): } tc = - 68,46$$

En este caso  $|tt| < |tc|$ : Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (H1). Se puede afirmar que el valor promedio analizado para Hidrocarburos totales, no excede el límite de descarga permisible impuesto por el Acuerdo Ministerial N° 097-A.

#### **4.1.16 Prueba de hipótesis para Tensoactivos.**

El Acuerdo Ministerial N° 097-A para límites de descarga a un cuerpo de agua dulce impone un límite máximo permisible de 0,5 mg/L para Tensoactivos. Se tomaron 4 muestras de agua tratada durante el periodo de un mes y se analizó por medio de un laboratorio particular acreditado por la SAE, obteniendo como promedio 0,32 mg/L con una desviación estándar de 0,09 mg/L. Se comprobó que la hipótesis del promedio teórico igual a 0,5 mg/L en contraposición a la hipótesis alternativa de que es menor a 0,5 mg/L en el nivel de significancia del 5%.

$$n = 4$$

$$\text{Media muestral } (\bar{X}): \bar{X} = 0,32 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis nula (Ho): Ho: } u = 0,5 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis alternativa (H1): H1: } u < 0,5 \text{ mg/L}$$

$$\text{Nivel de significancia } (\alpha): \alpha = 5 \%$$

$$\text{Desviación estándar (s): } s = 0,09 \text{ mg/L}$$

$$\text{t tabulado (tt): } tt = - 2,353$$

$$\text{t calculado (tc): } tc = - 3,93$$

En este caso  $|tt| < |tc|$ : Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (H1). Se puede afirmar que el valor promedio analizado para Tensoactivos, no excede el límite de descarga permisible impuesto por el Acuerdo Ministerial N° 097-A.

#### **4.1.17 Prueba de hipótesis para Zinc.**

El Acuerdo Ministerial N° 097-A para límites de descarga a un cuerpo de agua dulce impone un límite máximo permisible de 5 mg/L para Zinc. Se tomaron 4 muestras de agua tratada durante el periodo de un mes y se analizó por medio de un laboratorio particular acreditado por la SAE, obteniendo como promedio 0,06 mg/L con una desviación estándar de 0,0168 mg/L. Se comprobó que la hipótesis del promedio teórico igual a 5 mg/L en contraposición a la hipótesis alternativa de que es menor a 5 mg/L en el nivel de significancia del 5%.

$$n = 4$$

$$\text{Media muestral } (\bar{X}): \bar{X} = 0,06 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis nula (Ho): } Ho: u = 5 \text{ mg/L}$$

$$\text{Hipótesis alternativa (H1): } H1: u < 5 \text{ mg/L}$$

$$\text{Nivel de significancia } (\alpha): \alpha = 5 \%$$

$$\text{Desviación estándar (s): } s = 0,0168 \text{ mg/L}$$

$$t \text{ tabulado (tt): } tt = - 2,353$$

$$t \text{ calculado (tc): } tc = - 588,10$$

En este caso  $|tt| < |tc|$ : Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (H1). Se puede afirmar que el valor promedio analizado para Zinc, no excede el límite de descarga permisible impuesto por el Acuerdo Ministerial N° 097-A.

## 4.2 Discusión de resultados

Mediante el estudio estadístico del agua analizada durante el periodo de un mes se evidencio que el promedio realizado para cada parámetro demandado por el Acuerdo Ministerial N° 097-A, fue menor al límite máximo permisible. Como puede verse en la Tabla 12.

A lo largo del mes de operación todos los parámetros analizados reportaron valores por debajo de la norma aplicada. A excepción de tensoactivos analizados en la semana 3, donde el valor obtenido excedió por 0,11 mg/L al valor dictado por la norma. Esto ocurrió debido al incremento de lavado de maquinaria, para dicho lavado se empleaba detergentes industriales que permiten remover toda la grasa y suciedad presente. Por lo que se sugirió a la empresa Halliburton utilizar detergentes biodegradables.

Tabla 12.

Datos obtenidos del análisis de agua tratada con respecto a los límites de descarga establecidos en el Acuerdo Ministerial 097 - A.

| Parámetros                    | Expresado como                         | Unidad | Límite máximo permisible | Semana 1 | Semana 2 | Semana 3    | Semana 4 | Promedio |
|-------------------------------|--|--------|--------------------------|----------|----------|-------------|----------|----------|
| Bario                         | Ba                                     | mg/L   | 2,0                      | 0,30     | 0,18     | 0,42        | 0,27     | 0,29     |
| Cadmio                        | Cd                                     | mg/L   | 0,02                     | 0,01     | 0,01     | 0,01        | 0,01     | 0,009    |
| Nitrógeno Amoniacal           | N                                      | mg/L   | 30,0                     | 1,12     | 5,89     | 2,37        | 2,81     | 3,048    |
| Cloruros                      | Cl                                     | mg/L   | 1000                     | 381,41   | 420,18   | 453,23      | 356,12   | 402,74   |
| Cobre                         | Cu                                     | mg/L   | 1,0                      | 0,20     | 0,12     | 0,46        | 0,28     | 0,265    |
| Cromo total                   | Cr                                     | mg/L   | 0,5                      | 0,10     | 0,21     | 0,12        | 0,10     | 0,133    |
| Demanda bioquímica de oxígeno | DBO5                                   | mg/L   | 100                      | 30,00    | 23,00    | 18,00       | 12,00    | 20,75    |
| Fenoles                       | Fenol                                  | mg/L   | 0,2                      | 0,05     | 0,05     | 0,1         | 0,07     | 0,07     |
| Mercurio total                | Hg                                     | mg/L   | 0,005                    | 0,002    | 0,002    | 0,002       | 0,002    | 0,00175  |
| Níquel                        | Ni                                     | mg/L   | 2,0                      | 0,10     | 0,09     | 0,09        | 0,16     | 0,11     |
| Oxígeno disuelto              | O                                      | mg/L   | **                       | 6,20     | 8,12     | 5,76        | 7,89     | 6,99     |
| Demanda química de oxígeno    | DQO                                    | mg/L   | 200                      | 120      | 98       | 180         | 112      | 127,5    |
| Vanadio                       | V                                      | mg/L   | **                       | 0,40     | 0,29     | 0,47        | 0,32     | 0,37     |
| Plomo                         | Pb                                     | mg/L   | 0,2                      | 0,15     | 0,12     | 0,16        | 0,10     | 0,1325   |
| Potencial Hidrógeno           | pH                                     |        | 6-9                      | 6,83     | 6,59     | 6,30        | 7,20     | 6,73     |
| Sólidos totales               | ST                                     | mg/L   | 1600                     | 910,51   | 945,16   | 1120,83     | 830,97   | 951,87   |
| Sulfatos                      | SO4                                    | mg/L   | 1000                     | 46,00    | 57,19    | 112,03      | 52,18    | 66,85    |
| Hidrocarburos totales         | TPH                                    | mg/L   | 20,0                     | 1,20     | 1,18     | 2,30        | 2,21     | 1,72     |
| Parámetros                    | Expresado como                         | Unidad | Límite máximo permisible | Semana 1 | Semana 2 | Semana 3    | Semana 4 | Promedio |
| Tensoactivos                  | Sustancias Activas al azul de metileno | mg/L   | 0,5                      | 0,31     | 0,15     | <b>0,61</b> | 0,22     | 0,32     |
| Zinc                          | Zn                                     | mg/L   | 5,0                      | 0,05     | 0,05     | 0,08        | 0,06     | 0,06     |

Nota: Datos proporcionados por empresa Halliburton.

## 5 Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

- En el presente trabajo se diseñó, implementó y monitoreo un sistema de tratamiento de aguas industriales perteneciente a la empresa Halliburton base Coca, en referencia a la evaluación de conformidad con el Acuerdo Ministerial N° 097-A. Lo más importante del diseño de la planta de tratamiento de agua industriales es la caracterización física, química y biología del agua a ser tratada porque a partir dichos datos se seleccionaron los métodos de saneamiento más idóneos para tratar el agua residual. El aporte eficaz fue el conocimiento técnico adquirido mediante bibliografía y experiencia en campo.
- Se describieron las condiciones de la planta de tratamiento de aguas industriales que operaba en la empresa Halliburton base Coca. Aquí se evidenció deterioro físico, derrames de agua contaminada y etapas de saneamiento que no se encontraban en funcionamiento ya que no tenían un correcto mantenimiento, su tiempo de vida útil terminó y las condiciones de operación favorecieron la corrosión de las etapas de tratamiento.
- Se determinaron los parámetros de los efluentes industriales que se encontraban fuera de la normativa de conformidad con el Acuerdo Ministerial N° 097-A. En las cuales se evidenciaron agentes contaminantes tales como: Demanda química de oxígeno, tensoactivos, hidrocarburos totales y fenoles. Estos parámetros no lograron ser mitigados por la antigua planta de tratamiento debido al deterioro en el que se encontraba.
- Se analizaron los parámetros físicos, químicos y organolépticos del agua a ser tratada. Con esto se encontraron los agentes contaminantes con mayor presencia, tales como: Demanda química de oxígeno, tensoactivos,

conductividad eléctrica, sólidos disueltos, hidrocarburos totales y fenoles. Esto ayudó a elaborar un flujograma del proceso el cual posee pretratamiento y tratamientos primarios, secundarios y terciarios que forman parte del tren de tratamiento. Lo que más influyó en el análisis químico es la correcta preparación de las muestras de agua cruda, debido a que la presencia de aceites, grasa, petróleo y sólidos sedimentables causan interferencia en los equipos de monitoreo, consecuentemente reportan un resultado erróneo.

- Se implementó una planta de tratamiento de aguas industriales que cumple con la normativa de calidad ambiental y descarga de efluentes N° 097- A, misma que es regulada por el municipio de la ciudad de El Coca. Lo más importante de la implementación es el desarrollo del flujograma del proceso ya que en él tiene que incluirse etapas de tratamiento capaces de remover los agentes contaminantes presentes en el agua residual analizada, el flujograma de proceso desarrollado es específico para tratar las aguas industriales de la empresa Halliburton, debido a que la presencia de distintos contaminantes y su respectiva concentración varían conforme a los trabajos que desarrolle cada empresa.
- Se realizó el acondicionamiento de cada una de las etapas del proceso, así como también de los mecanismos industriales que intervienen en el tratamiento. Lo más influyente del acondicionamiento de la planta es el correcto suministro de agente químico empleado en la etapa de coagulación - floculación, ya que una baja dosificación del agente coagulante causa menor remoción de sólidos disueltos y mayor tiempo de sedimentación. En el caso opuesto en el que se suministre exceso de agente coagulante el pH de la mezcla baja y no produce formación de coágulos, lo que causa que no exista remoción de sólidos disueltos, afectando directamente a las etapas consecuentes.

- Se evaluó el agua tratada según el reglamento a la ley de gestión ambiental para la prevención y control de la contaminación ambiental. Norma de calidad ambiental y descarga de efluentes, Acuerdo Ministerial número 097-A. En donde todos los parámetros evaluados presentaron valores inferiores a los límites de descarga establecidos. Lo más importante de la evaluación del agua tratada fue la correcta operación de la planta de tratamiento de aguas industriales porque un error en la dosificación de agentes químicos, un incorrecto manejo de los reflujos o un exceso de agentes contaminantes pueden causar fallas en diversas etapas del tratamiento, lo que provocaría que el agua evaluada no cumpla con los estándares de calidad regidos por la norma. Lo que más ayudó en el correcto manejo de la planta es el continuo monitoreo del afluente, ya que una desviación de los parámetros previamente establecidos puede ser remediados con una pronta acción.

## 5.2 Recomendaciones

- Se recomienda evaluar la cantidad de materia orgánica antes de la etapa de desinfección, ya que estos en presencia de cloro pueden producir trihalometanos mismo que son altamente cancerígenos.
- En la eliminación de tensoactivos se recomienda la evaluación de otros métodos de remoción como oxidación avanzada, ya que la presencia de estos puede provocar un aporte de nutrientes como el fósforo lo que puede causar eutrofización del agua, desembocando en un desbalance en la vida acuática.
- Se requiere realizar un estudio acerca del efecto de la difusión de burbuja fina en tratamientos biológicos, esto debido a que se identificó mayor remoción de materia orgánica cuando el suministro de oxígeno se realizó mediante un burbujeo “fino”. La afirmación de este efecto puede ayudar a reducir costos por la implementación de difusores y compresores de menos potencia.

## 6 Bibliografía

Acuerdo ministerial N° 097-A. (Miércoles de Noviembre de 2015). *Registro oficial*.

Obtenido de Registro oficial:

[https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento\\_Registro-Oficial-No-387-04-noviembre-2015\\_0.pdf](https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento_Registro-Oficial-No-387-04-noviembre-2015_0.pdf). Recuperado el 12 de noviembre de 2020.

Alvarez Da Costa, A. A. (2012). *Procedimiento para el diseño de una planta de tratamiento de efluentes industriales*. Sartenejas: Universidad Simón Bolívar.

Angarita, C. (2016). *Estimación del Modelo Cinético de la Pirólisis de Cascarilla de Café a partir de un Análisis Termogravimétrico*. Universidad de los Andes.

Arocutipá, J. H. (2013). *Evaluación y propuesta técnica de una planta de tratamiento de aguas residuales en massiapo del distrito de alto inambari - Sandía*. Puno: Universidad Nacional Del Altiplano.

Consejo Nacional de Desarrollo. (22 de Septiembre de 2017). *Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021*. Obtenido de Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021: [https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/10/PNBV-26-OCT-FINAL\\_0K.compressed1.pdf](https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/10/PNBV-26-OCT-FINAL_0K.compressed1.pdf)

Ecuador, A. N. (6 de Agosto de 2014). *Ley orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua*. Obtenido de Ley orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua : <http://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/05/Ley-de-RH.pdf>. Recuperado el 26 de septiembre del 2020.

- Fernández Alba, A. R., García Rosal, R., & Dorado Valiño, M. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Madrid: Dirección General de Universidades e Investigación.
- García Gómez, C., & Gortáres Moroyoqui, P. (2011). *Contaminantes emergentes: efectos y tratamientos de remoción*. Sonora - México: Québec QC.
- HACH. (2016). *DR900 Colorimeter*. Obtenido de <https://www.hach.com/colorimeters/dr900-colorimeter/family-downloads?productCategoryId=35547203827>. Recuperado el 12 de junio del 2020.
- Halliburton. (10 de Enero de 2019). *Halliburton 100 years*. Obtenido de Halliburton 100 years: <https://www.halliburton.com/en-US/about-us/community/default.html?node-id=hgeyxt8u>. Recuperado el 12 de junio del 2020.
- INEC. (2017). *Módulo de Información Ambiental en Hogares*. Recuperado el 12 de junio del 2020.
- Longest, H., & Mayo, F. (2015). *Onsite Wastewater Treatment and Disposal Systems*. Washington DC: EPA.
- Manahan, S. E. (2007). *Introducción a la Química Ambiental*. Mexico, D.F: Reverté Ediciones, S.A. de C.V y Editorial Reverté, S.A.
- Marín Galvín, R. (2013). *Procesos fisicoquímicos en depuración de aguas*. Madrid: Diaz de Santos, S.A.
- Moreano Culqui, I. F. (2021). *Diseño, implementación y monitoreo de un sistema de tratamiento de aguas industriales perteneciente a la empresa Halliburton*

*campamento Ecuador – Coca, con base en la evaluación de conformidad con la Acuerdo Ministerial N° 097-A.* Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas .

Nemerow, N. L. (2002). *Agguas residuales industriales Teorías, Aplicaciones y tratamiento.* Madrid: Addison - Wesley.

Noyola, A., Morgan, J. M., & Guereca, L. P. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales.* Mexico: Instituto de ingeniería UNAM.

NTE INEN 2169. (2013). *Agua. Calidad del agua. Muestreo. Manejo y conservación de muestras.* Obtenido de agua. Calidad del agua. Muestreo. Manejo y conservación de muestras: <http://www.trabajo.gob.ec/wp-content/uploads/2012/10/NTE-INEN-2169-Agua.-Calidad-Del-Agua.-Muestreo.-Manejo-Y-Conservaci%C3%93n-De-Muestras.Pdf>. Recuperado el 12 de junio del 2020.

Orozco Barrenetxea, C., & Pérez Serrano, A. (2003). *Contaminación Ambiental.* Madrid: Ediciones Paraninfo, SA.

Osorio, F., Torres, J. C., & Sánchez, M. (2010). *Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes comtaminantes.* Madrid: Ediciones Díaz de Santos.

Peisol. (2017). *Ingeniería y soluciones de proyectos integrales.* Lago Agrio: Peisol. Recuperado el 12 de junio del 2020.

Peréz Olmo, J. M., & Menéndez Gutiérrez, C. (2007). *Procesos para el tratamiento biológico de aguas residuales industriales.* Valencia: Editorial Universitaria.

Poch, M., Cortés, U., & Comas, J. (2012). *Decisiones en los sistemas de saneamiento*.

Girona: Universidad de Girona.

Segura, D., Noguez, R., & Espín, G. (2007). Contaminación ambiental y bacterias

productoras de plásticos biodegradables. *Biotecnología*, 361-372.

Sierra Ramírez, C. A. (2011). *Calidad del agua Evaluación y diagnóstico*. Medellín:

Universidad de Medellín.

Suárez, S. D. (2014). *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales*

*provenientes de las descargas de una centro comercial de la ciudad de quito*

*mediante procesos de electrocoagulación y adsorción en carbón activado*. Quito:

Escuela Politécnica Nacional.

Williams, R., & Davidovich, L. (2003). *Calidad del agua en las Américas*. Mexico: IANAS.

Yáñez, F. (2013). *Consideraciones de ingeniería en el tratamiento de desechos*

*industriales*. México: CEPIS.

# ANEXOS

