

**Evaluación de la Operación y Optimización de la Planta de Tratamiento de Aguas  
Residuales de Paipa Mediante un Simulador de Procesos Biológicos**

**Ingrid Julieth Díaz Vargas  
Erika Dayana Figueredo Tolosa**

**Universidad de Boyacá  
Facultad de Ciencias e Ingeniería  
Ingeniería Ambiental**

**Tunja**

**2022**

**Evaluación de la Operación y Optimización de la Planta de Tratamiento de Aguas  
Residuales de Paipa Mediante un Simulador de Procesos Biológicos**

**Ingrid Julieth Díaz Vargas  
Erika Dayana Figueredo Tolosa**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniera Ambiental**

**Director:**

**Ingeniero Jaime Díaz Gómez**

**Codirector:**

**Ingeniero Diego Camilo Guio Sandoval**

**Universidad de Boyacá  
Facultad de Ciencias e Ingeniería  
Ingeniería Ambiental**

**Tunja**

**2022**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

Firma del Presidente del Jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Tunja, 19 de abril del 2022

“Únicamente el Graduando es responsable de las ideas expuestas en el presente trabajo”. (Lineamientos constitucionales, legales e institucionales que rigen la propiedad intelectual).

A Dios por darnos la oportunidad de culminar de manera exitosa nuestra carrera, iluminando cada momento en ésta etapa de nuestras vidas, brindándonos esperanza y aliento en aquellos instantes difíciles de afrontar.

A las familias Díaz Vargas y Figueredo Tolosa quienes, con amor, sacrificio, esfuerzo y paciencia nos han acompañado a lo largo de todos estos años, y que el día de hoy deja como resultado un sueño más cumplido como profesionales.

A todos los profesores que hicieron parte de este camino de aprendizaje, sus lecciones y dedicación sin duda alguna contribuyeron a formarnos como profesionales.

Ingrid y Erika.

### **Agradecimientos**

Ingeniero Jaime Díaz Gómez docente de la Universidad de Boyacá, por su constante asesoría y apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

Ingeniero Diego Camilo Guio Sandoval docente de la Universidad de Boyacá, por su colaboración logística, orientación y apoyo.

Finalmente, a la Universidad de Boyacá por brindarles los recursos necesarios para realizar nuestra investigación y en general a todas aquellas personas que aportaron su granito de arena para que nosotras pudiéramos lograr nuestro sueño.

## Contenido

	Pág.
Introducción.....	19
Condiciones actuales de la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Paipa .....	21
Río Chicamocha.....	21
PTAR .....	21
Recolección de Datos.....	29
Prueba de normalidad.....	31
Modelo del sistema basado en el modelo ASM1 de procesos biológicos al sistema de tratamiento del municipio de Paipa .....	50
Aplicación del Consejero del Afluente en GPS-X.....	50
Modelación .....	57
Chequeo del volumen requerido de los tanques de aireación .....	65
Calidad del agua.....	66
Datos medidos.....	67
Escenarios de optimización y operación para el sistema de tratamiento.....	69
Primer escenario de optimización.....	69
Segundo escenario de optimización.....	72
Cálculo del sistema de aireación con Aqua Aero .....	74
Escenario actual.....	74
Escenario futuro .....	77
Conclusiones.....	82
Recomendaciones .....	84
Referencias .....	85
Anexos.....	88

**Listado de Tablas**

	Pág.
Tabla 1. Caracterizaciones del agua residual, afluente.....	29
Tabla 2. Caracterizaciones del agua residual, efluente.....	30
Tabla 3. Análisis de valores atípicos con el Rango Intercuartílico para el afluente.....	34
Tabla 4. Análisis de valores atípicos con el Rango Intercuartílico para el efluente.....	35
Tabla 5. Cálculo de la Distribución Logarítmica Normal para el Nitrógeno Orgánico .....	44
Tabla 6. Promedio de la caracterización del afluente .....	47
Tabla 7. Promedio de la caracterización del efluente.....	48
Tabla 8. Comparación con valores típicos de aguas residuales domésticas.....	49
Tabla 9. Comparación datos del efluente con resolución 631 de 2015 .....	67
Tabla 10. Comparación datos reales vs datos modelados .....	68
Tabla 11. Datos obtenidos del modelo optimizado .....	81



### Listado de Figuras

	Pág.
Figura 1. Ubicación de la PTAR de Paipa.....	22
Figura 2. Cámara de llegada y alivio del sistema de tratamiento .....	23
Figura 3. Tratamiento preliminar.....	23
Figura 4. Tanque de homogeneización.....	23
Figura 5. Bombeo a la línea de tratamiento secundario .....	24
Figura 6. Tamices estáticos .....	24
Figura 7. Reactores biológicos .....	25
Figura 8. Sedimentadores secundarios .....	25
Figura 9. Espesador de lodos.....	26
Figura 10. Filtros Prensa.....	26
Figura 11. Equipo soplador lobular .....	27
Figura 12. Filtros a presión.....	28
Figura 13. Efluente del tratamiento .....	28
Figura 14. Cajas, DQO ( $\text{mgO}_2/\text{L}$ ), $\text{DBO}_5$ ( $\text{mgO}_2/\text{L}$ ), SST ( $\text{mgSST}/\text{L}$ ) y SSV ( $\text{mg SSV}/\text{L}$ ), izquierda en afluente y derecha en efluente.....	31
Figura 15. Cajas, Nitrógeno Amoniacal ( $\text{mgNH}_3\text{-N}/\text{L}$ ), Nitrógeno Kjeldahl Total ( $\text{mgN}/\text{L}$ ) y Nitrógeno Orgánico ( $\text{mgNorg}/\text{L}$ ), izquierda en afluente y derecha en efluente.....	32
Figura 16. Esquema de detección de valores atípicos basado en el rango intercuartílico (RIC) .....	33
Figura 17. Línea de tendencia de DQO ( $\text{mgO}_2/\text{L}$ ) a la izquierda y $\text{DBO}_5$ ( $\text{mgO}_2/\text{L}$ ) a la derecha, con los límites superiores e inferiores en el afluente .....	35
Figura 18. Línea de tendencia SST ( $\text{mgSST}/\text{L}$ ) a la izquierda y SSV ( $\text{mgSSV}/\text{L}$ ) a la derecha, con los límites superiores e inferiores en el afluente.....	36

Figura 19. Línea de tendencia Nitrógeno Amoniacal ( $\text{mg NH}_3\text{-N/L}$ ) a la izquierda y Nitrógeno Kjeldahl Total ( $\text{mg N/L}$ ) a la derecha, con los respectivos límites superiores e inferiores en el afluente .....	36
Figura 20. Línea de tendencia del Nitrógeno Orgánico ( $\text{mgNorg/L}$ ), con los respectivos límites superiores e inferiores en el afluente .....	37
Figura 21. Línea de tendencia DQO ( $\text{mgO}_2\text{/L}$ ) a la izquierda y DBO <sub>5</sub> ( $\text{mgO}_2\text{/L}$ ) a la derecha, con los respectivos límites superiores e inferiores en el efluente.....	37
Figura 22. Línea de tendencia SST ( $\text{mgSST/L}$ ) a la izquierda y SSV ( $\text{mgSSV/L}$ ) a la derecha, con los respectivos límites superiores e inferiores en el efluente.....	38
Figura 23. Línea de tendencia Nitrógeno Amoniacal ( $\text{mgNH}_3\text{-N/L}$ ) a la izquierda y Nitrógeno Kjeldahl Total ( $\text{mgN/L}$ ) a la derecha, con los respectivos límites superiores e inferiores en el efluente .....	38
Figura 24. Línea de tendencia del Nitrógeno Orgánico ( $\text{mgNorg/L}$ ), con los respectivos límites superiores e inferiores en el efluente .....	39
Figura 25. Cajas, DQO ( $\text{mgO}_2\text{/L}$ ), DBO <sub>5</sub> ( $\text{mgO}_2\text{/L}$ ), SST ( $\text{mgSST/L}$ ) y SSV ( $\text{mgSSV/L}$ ), izquierda en afluente y derecha en efluente.....	40
Figura 26. Nitrógeno Amoniacal ( $\text{mgNH}_3\text{-N/L}$ ), Nitrógeno Kjeldahl Total ( $\text{mgN/L}$ ) y Nitrógeno Orgánico ( $\text{mgNorg/L}$ ), izquierda en afluente y derecha en efluente.....	40
Figura 27. Nitrógeno Orgánico ( $\text{mgNorg/L}$ ), en el afluente y efluente.....	41
Figura 28. Prueba de normalidad DQO ( $\text{mgO}_2\text{/L}$ ) a la izquierda y DBO <sub>5</sub> ( $\text{mgO}_2\text{/L}$ ) a la derecha, en el afluente .....	41
Figura 29. Prueba de normalidad SST ( $\text{mgSST/L}$ ) a la izquierda y SSV ( $\text{mgSSV/L}$ ) a la derecha, en el afluente .....	42
Figura 30. Prueba de normalidad Nitrógeno Amoniacal ( $\text{mgNH}_3\text{-N/L}$ ) a la izquierda y Nitrógeno Kjeldahl Total ( $\text{mgN/L}$ ) a la derecha, en el afluente.....	42
Figura 31. Prueba logarítmica de normalidad Nitrógeno Orgánico ( $\text{mgNorg/L}$ ), en el afluente .....	43

Figura 32. Prueba de normalidad DQO ( $\text{mgO}_2/\text{L}$ ) a la izquierda y $\text{DBO}_5$ ( $\text{mgO}_2/\text{L}$ ) a la derecha, en el efluente .....	44
Figura 33. Prueba de normalidad SST ( $\text{mgSST}/\text{L}$ ) a la izquierda y SSV ( $\text{mgSSV}/\text{L}$ ) a la derecha, en el efluente .....	45
Figura 34. Prueba de normalidad Nitrógeno Amoniacal ( $\text{mgNH}_3\text{-N}/\text{L}$ ) a la izquierda, Nitrógeno Kjeldahl Total ( $\text{mgN}/\text{L}$ ) a la derecha, en el efluente.....	45
Figura 35. Prueba logarítmica de normalidad Nitrógeno Orgánico ( $\text{mgNorg}/\text{L}$ ) en el efluente .....	46
Figura 36. Interfaz GPS-X.....	51
Figura 37. Librería Carbono- Nitrógeno .....	51
Figura 38. Tabla de procesos.....	52
Figura 39. Construcción del modelo.....	53
Figura 40. Ruta consejero del afluente .....	53
Figura 41. Ventana del consejero del afluente .....	54
Figura 42. Ventana del consejero del afluente .....	56
Figura 43. Ajuste de datos en el consejero del afluente .....	56
Figura 44. Operación actual de la PTAR.....	57
Figura 45. Consejero del afluente.....	58
Figura 46. Librería del consejero del afluente.....	59
Figura 47. Librería Nitrógeno del afluente.....	61
Figura 48. Librería Carbono del efluente .....	62
Figura 49. Librería Nitrógeno del efluente.....	62
Figura 50. Verificación edad del lodo en GPS-X para el reactor 1 .....	64
Figura 51. Verificación edad del lodo en GPS-X para el reactor 2.....	64
Figura 52. Esquema en Capdetworks .....	65
Figura 53. Verificación del volumen de los reactores en Capdetworks .....	66

Figura 54. Escenario Futuro .....	69
Figura 55. Comprobación escenario futuro .....	70
Figura 56. Comprobación del volumen de los reactores en el escenario futuro.....	71
Figura 57. Librería Nitrógeno escenario futuro del efluente .....	71
Figura 58. Escenario futuro modelado con el caudal de exceso.....	72
Figura 59. Librería carbono para el efluente para el segundo escenario de optimización .....	73
Figura 60. Librería nitrógeno para el efluente para el segundo escenario de optimización .....	74
Figura 61. Selección de sopladores en Aqua Aero .....	75
Figura 62. Soplador de lóbulos rotativos de Kaeser de perfil Omega 43 Plus – DB 236C.....	76
Figura 63. Soplador de lóbulos rotativos de Kaeser de perfil Omega 43 Plus – DB 236C.....	76
Figura 64. Difusores Roeflex de la empresa Passavant – Intech.....	77
Figura 65. Selección de sopladores en Aqua Aero.....	78
Figura 66. Soplador Omega 52 Plus de Keaser .....	79
Figura 67. Configuración de los nuevos difusores de los reactores biológicos.....	79
Figura 68. Difusores Roeflex HL EPDM de la empresa Passavant – Intech .....	80

**Listado de Anexos**

	Pág.
Anexo A. Anteproyecto.....	89
Anexo B. Base de Datos (Adjunto en CD ROOM).....	145
Anexo C. Reporte de costos de Aqua Aero para el escenario actual.....	146
Anexo D. Reporte de costos de Capdetworks para el escenario futuro.....	151
Anexo E. Reporte de costos de Aqua Aero para el escenario futuro.....	172

## Glosario

***Aguas residuales:*** son cualquier tipo de agua cuya calidad está afectada negativamente por la influencia antropogénica (“Zarza”, 2019).

***Aireación extendida:*** es un tipo de tecnología de lodos activados caracterizada por su implementación con una edad del lodo entre 20-40 días.

***Aqua Aero:*** software para pre dimensionamiento de sistemas de tratamiento de aguas residuales por lodos activados.

***CapdetWorks:*** software para pre dimensionamiento de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

***Escenario de optimización:*** se refiere a la utilización de un sistema de referencia para evaluar y analizar los diferentes procesos que se llevan a cabo en este y de esta manera emitir juicios y plantear soluciones.

***Flóculo:*** unidad ecológica y estructural del fango activo formada por una agrupación de bacterias y otros microorganismos que permiten la oxidación de la materia orgánica en las balsas de activación (“Depuración de aguas residuales”, s.f.).

***Fraccionamiento del agua residual:*** es la discriminación de los constituyentes presentes en las aguas residuales considerando los constituyentes considerados en un modelo de procesos biológicos.

***GPS-X:*** es un simulador de procesos biológicos empleados para el tratamiento de aguas residuales (“HATCH”, 2022).

**Librería:** una librería en GPS-X relaciona las variables de estado consideradas en el modelo con las variables compuestas. Estas últimas en general son los parámetros de calidad más comúnmente medidos en las aguas residuales.

**Lodo activado:** el término “activo” se refiere a la capacidad de este lodo (microorganismos) para metabolizar la materia orgánica soluble y coloidal a dióxido de carbono y agua. La mezcla de los lodos activos y del agua residual se denomina “licor de mezcla” (Buitrón et al., 2018, pág. 13).

**Modelación:** la modelación de sistemas es una descripción matemática de una serie de procesos que ocurren en un espacio delimitado.

**Modelo ASMI:** es un modelo determinístico que intenta representar los procesos y transformaciones que se llevan a cabo en un reactor biológico de lodos activados (Henze et al., 2000).

**Organismos autótrofos:** son los microorganismos que emplean CO<sub>2</sub> como fuente de carbono

Organismos heterótrofos: son los microorganismos que emplean materia orgánica como fuente de carbono y fuente de energía.

**Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR):** es el conjunto de obras, instalaciones y procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin transformar los contaminantes presentes en el agua.

**Proceso de lodos activados:** proceso biológico de tratamiento de aguas residuales en el que los microorganismos crecen en suspensión y se agrupan formando flóculos que a su vez forman una masa microbiana activa llamada “lodo activo o activado” (Buitrón et al., 2018, p.13).

***Prueba de normalidad:*** prueba estadística empleada para evaluar si la información recolectada corresponde a una distribución normal de probabilidad.



## Resumen

### **Evaluación de la operación y optimización de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Paipa mediante un simulador de procesos biológicos:**

El estudio presenta la optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Paipa, se evalúa las condiciones actuales de la operación, y se plantean escenarios de optimización del sistema.

El objetivo del estudio es evaluar y proponer la optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de Paipa empleando el simulador de procesos biológicos GPS-X y otras herramientas de pre dimensionamiento de plantas de tratamiento de aguas residuales.

En proyecto empleó un tipo de investigación aplicada y enfocada a un estudio de caso, porque pretende contrastar la teoría con la realidad, es decir, emplea información teórica que se procesa a través de una serie de herramientas de simulación para evaluar el sistema actual y generar escenarios de optimización. Todo ello se llevó a cabo con la recolección de los datos brindados por la empresa Red Vital de Paipa mediante la creación de una base de datos a la cual se le realizó su respectivo análisis estadístico, para luego proceder a modelar el sistema actual de la PTAR (planta de tratamiento de agua residual) y evaluar el estado de la misma para detectar sus falencias y finalmente proponer los escenarios de optimización.

Finalmente, se concluyó que la PTAR de Paipa debe ser actualizada pues el sistema de aireación constituido por sopladores y difusores que ha cumplido con su vida útil. Adicionalmente el crecimiento del municipio requiere la expansión del sistema para tratar el caudal de lodo de exceso que no se está tratando en la actualidad. Por tanto, se proponen tres escenarios de optimización los cuales consisten en, el cambio de los sopladores y difusores de los reactores biológicos. Por otro lado, adicionar la recirculación del agua que sale del espesador hacia los tanques de aireación, y, por último, la construcción de dos tanques adicionales con un volumen de 1310 m<sup>3</sup> cada uno, con sus respectivos sedimentadores secundarios para el tratamiento del caudal de exceso que se vierte al río Chicamocha sin tratamiento, todo esto con el fin de optimizar los procesos que se llevan a cabo en la PTAR.

**Palabras Clave:** procesos biológicos, simulador, modelo ASM1, escenarios de optimización, sistema de aireación.

### Abstract

#### **Evaluation of the Operation and Optimization of the Paipa Wastewater Treatment Plant Using a Simulator of Biological Processes:**

The study presents the optimization of the wastewater treatment plant in the municipality of Paipa, evaluates the current conditions of the operation, and proposes optimization scenarios of the system.

The objective of the study is to evaluate and propose the optimization of the wastewater treatment system of the municipality of Paipa using the simulator of biological processes GPS-X and other tools for pre-sizing wastewater treatment plants.

In project employed a type of applied research and focused on a case study, because it aims to contrast theory with reality, that is, it uses theoretical information that is processed through a series of simulation tools to evaluate the current system and generate optimization scenarios. All this was carried out with the collection of data provided by the company Red Vital Paipa by creating a database to which was made its respective statistical analysis, then proceed to model the current system of the PTAR (wastewater treatment plant) and evaluate the state of the same to detect its shortcomings and finally propose optimization scenarios

Finally, it was concluded that the Paipa PTAR should be updated because the aeration system consisting of blowers and diffusers that has served its useful life. Additionally, the growth of the municipality requires the expansion of the system to treat the Excess sludge flow that is not currently being treated. Three proposals are therefore proposed: Optimization scenarios which consist of, the change of blowers and diffusers of biological reactors. On the other hand, add the recirculation of the water leaving, the construction of two air tanks with a volume of 1310 m<sup>3</sup> each, with their respective sedimentary treatment of the excess flow that is poured into the Chicamocha river without All this in order to optimize the processes carried out in the PTAR.

**Keywords:** biological processes, simulator, model ASM1, optimization scenarios, aeration system.

## Introducción

La planta de tratamiento de aguas residuales del Municipio de Paipa fue diseñada y construida para una población de 17000 habitantes. Tiene como afluente dos bombeos: uno de la EBAR (estación de bombeo de aguas residuales) al pretratamiento de la PTAR, otro del pretratamiento (tanque de homogenización) a caja repartidora a tamices estáticos, a partir de los cuales se reparte a las líneas de tratamiento biológico, dichas entradas manejan un caudal de 30 L/s. “El tipo de proceso que se emplea en la PTAR es lodos activados con aireación extendida. En este proyecto se simuló el proceso biológico empleando un simulador de procesos biológicos que incluye el modelo general de lodos activados ASM 1” (Henze et al., 2000, p. 5), con el fin de evaluar y proponer la optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de Paipa mediante el simulador de procesos biológicos GPS-X. Para la caracterización del agua residual se tomaron los muestreos realizados por la empresa Red vital de Paipa SA. E.S.P entre los años 2018 y 2020 en diferentes épocas. Las mediciones se hicieron en muestras compuestas durante 24 horas en afluente y efluente. Las muestras analizadas se realizaron con las metodologías definidas por los Standard Methods.

La información de los muestreos se adjuntó en una base de datos empleada para organizar toda esta información de manera cronológica. También, con dicha información se evaluó la eficiencia de la PTAR y el funcionamiento de los procesos de la planta.

Con el promedio de los constituyentes de las aguas residuales se discriminó la caracterización del agua residual empleando el consejero del afluente del simulador GPS-X. En el simulador se seleccionó el modelo de procesos biológicos ASM1 y la librería Carbono-Nitrógeno para implementar el modelo de la PTAR por medio de un esquema que describe las unidades y las conexiones del sistema actual. Este esquema sirve para realizar las simulaciones del sistema actual y los escenarios de optimización propuestos.

La implementación del software GPS-X se empleó para evaluar un escenario actual para determinar el funcionamiento de la planta. Los otros escenarios se emplearon para evaluar la futura expansión ya que no toda el agua que llega a la PTAR es tratada.

En general, se realizó el proyecto en tres capítulos, en el primero se encontrará la descripción la zona de estudio, en el segundo se realizó la modelación del sistema y finalmente se espera proponer cambios en el sistema de manera que se pueda tratar el caudal

de exceso que entra a la planta, además del caudal de recirculación saliendo del espesador de lodos.

Este proyecto se realizó con el apoyo de la Alcaldía de Paipa y la Universidad de Boyacá que pusieron a disposición los recursos indispensables para el desarrollo del mismo.

## **Condiciones actuales de la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Paipa**

En el siguiente capítulo se describe la ubicación de la zona de estudio, el área, y sus principales puntos estratégicos. Además, se hace el análisis estadístico de los muestreos brindados por la empresa Red Vital de Paipa realizados entre los años 2018 y 2020 en diferentes épocas, por medio del laboratorio Analizar Laboratorio Físicoquímico LTDA, los cuales hicieron la toma de muestras compuestas durante 12 horas en cada uno de los puntos seleccionados para poder obtener las caracterizaciones del afluente y efluente. Las muestras analizadas en el laboratorio se realizaron con la metodología del Standard Methods, con el fin de realizar la base de datos para la modelación.

El municipio de Paipa está localizado en el valle de Sogamoso, uno de los valles internos más importantes de la región Andina, en la parte centro oriental del País y noroccidental del departamento de Boyacá a 2525 m.s.n.m, distancia aproximada 184 Km de Santafé de Bogotá y 40 Km de Tunja. Su cabecera municipal se encuentra a los 5°47' de latitud norte y 73°06' de longitud oeste. El Municipio de Paipa abarca una extensión de 30.592,41 hectáreas aproximadamente y cuenta con una población de aproximadamente 30740 habitantes y su temperatura promedio es de 13°C (Alcaldía Municipal de Paipa, 2013, p. 2).

### **Río Chicamocha**

La zona de estudio que se tendrá en cuenta en el presente proyecto está ubicada en la cuenca alta del río Chicamocha, localizada en la zona suroccidental del Departamento de Boyacá, dentro de los municipios de Duitama, Paipa, Pesca, Sotaquirá, Tuta y Firavitova, siendo el municipio de Paipa el que mayor porcentaje de superficie cubre dentro del área.

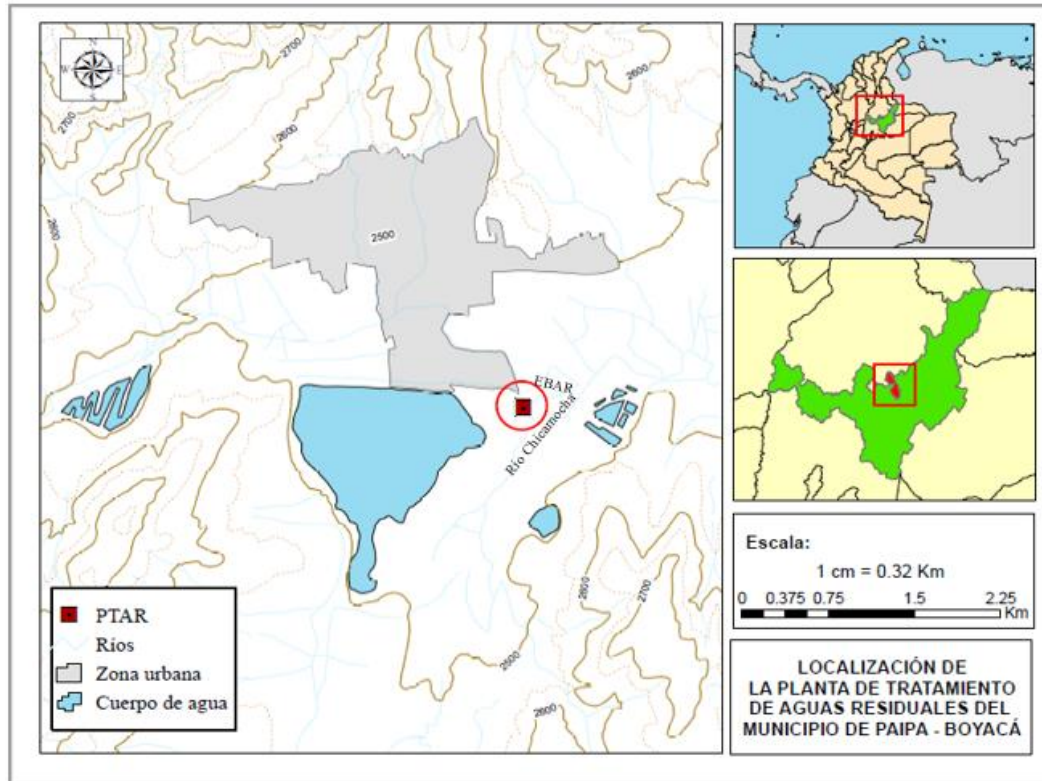
### **PTAR**

La PTAR de Paipa fue diseñada y construida alrededor del año 2000 para una población de 17000 habitantes con un caudal de 30 L/s. se encuentra ubicada en las

coordenadas: Latitud 5.7672 y Longitud -73.1083. Está localizada en una altitud de 2493 metros sobre el nivel del mar.

### Figura 1

*Ubicación de la PTAR de Paipa*



Fuente: Autoras.

El sistema de tratamiento, la PTAR tiene como afluente dos bombes: uno de la EBAR al pretratamiento de la misma (es importante tener en consideración que la misma se encuentra por fuera de la planta), una parte del caudal ingresa a la cámara de llegada (Figura 2) y luego pasa al pretratamiento y tanque de homogenización (Ver Figura 3 y 4), prosigue con un bombeo (Ver Figura 5) de 11.5 HP que se dirige a la caja repartidora para finalmente encontrarse con los tamices estáticos (Ver Figura 6) y de ahí se reparte a las líneas de tratamiento biológico.

**Figura 2**

*Cámara de llegada y alivio del sistema de tratamiento*



Fuente: Autoras.

**Figura 3**

*Tratamiento preliminar*



Fuente: Autoras.

**Figura 4**

*Tanque de homogeneización*



Fuente: Autoras.

**Figura 5**

*Bombeo a la línea de tratamiento secundario*



Fuente: Autoras.

**Figura 6**

*Tamices estáticos*



Fuente: Autoras.

La tecnología de tratamiento de las aguas residuales de la planta de Paipa es lodos activados por aireación extendida (Ver figura 7), conformada por dos líneas de tratamiento, cada una compuesta por un reactor aerobio con aireación difusa por membranas y sedimentador secundario con línea de recirculación de lodos (Ver Figura 8). Los dos tanques de aireación son rectangulares con dimensiones largo: 20 m; ancho: 13.6 m y profundidad: 4



m. Los dos sedimentadores secundarios son rectangulares con un largo: 3.5 m; ancho de 13.6 m y 3 m de profundidad.

### Figura 7

*Reactores biológicos*



Fuente: Autoras.

### Figura 8

*Sedimentadores secundarios*



Fuente: Autoras.

Ahora bien, el lodo que recircula pasa al tanque de aireación mediante un sistema de air lift que permite también la evacuación de lodo de exceso hacia un espesador por gravedad

(Ver Figura 9). El lodo espesado pasa a un filtro prensa que se encuentra fuera de servicio (Ver Figura 10).

### **Figura 9**

*Espesador de lodos*



Fuente: Autoras.

### **Figura 10**

*Filtros Prensa*



Fuente: Autoras.

Actualmente el suministro de aire se realiza por medio de dos equipos sopladores lobulares cada uno con un motor de 75 HP, de los cuales actualmente solo uno se encuentra

operativo. El funcionamiento de este sistema de aireación se realiza en modo manual mediante el encendido y apagado de los equipos bajo criterio de tiempo de suministro de aire y tiempo de parada. Esta labor es realizada y supervisada por el operador de planta (Ver Figura 11).

### **Figura 11**

*Equipo soplador lobular*



Fuente: Autoras.

El efluente sedimentado pasa por 2 filtros a presión (Ver Figura 12) y posteriormente a su descarga final (Ver Figura 13). Cabe resaltar que ya no está funcionando ningún laboratorio dentro de la planta, ni tampoco hay visita de ningún profesional en el tema, para controlar y vigilar la operación del sistema. Existen otros problemas relacionados con la utilización de las instalaciones para el almacenamiento inadecuado de materiales y objetos que no están relacionados con la PTAR.

**Figura 12***Filtros a presión*

Fuente: Autoras.

**Figura 13***Efluente del tratamiento*

Fuente: Autoras.

De igual forma, se debe tener en consideración que el municipio actualmente cuenta con aproximadamente 30.700 habitantes según la alcaldía de Paipa, de esta forma, el caudal de tratamiento de aguas residuales ha aumentado, por lo cual la planta no cuenta con la capacidad requerida para tratar dicho caudal de exceso y, en consecuencia, dicho excedente se envía sin tratamiento al río Chicamocha.

## Recolección de Datos

Con las caracterizaciones del agua residual suministradas por la empresa Red Vital Paipa S.A E.S.P. Se procedió a construir la base de datos en una hoja de cálculo de Excel. Se tuvieron 9 caracterizaciones, cada una con su respectiva fecha de monitoreo para diferentes constituyentes en afluente y efluente de la PTAR (Ver Tabla 1 y 2).

**Tabla 1**

*Caracterizaciones del agua residual, afluente*

Parámetro/ Fecha	Temperatura (°C)	Q aforo (L/s)	DQO total (mgO <sub>2</sub> /L)	DBO5 Total (mgO <sub>2</sub> /L)	SST (mgSST/L)	SSV (mgSSV/L)	Sólidos Sedimenta bles (SS) (mLSS/L)	Ortofosfatos (mP-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /L)	Fosforo total (mgP/L)	Nitratos- N (mgN03- N/L)	Nitritos- N (mgN02- N/L)	Nitrogeno Amoniacal (mgNH <sub>3</sub> - N/L)	Nitrogeno Total (mgN/L)	Nitrógeno Orgánico (mgNorg/L)	Sulfatos (mgS042- /L)	Sulfuros (mgS- 2/L)	Conductivid ad (µs/cm)	pH
9/11/2012	17.78	28.12	301	172	140	112	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1715	7.22
22/02/2014	19.82	23	404	227	70	56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1170	7.47
23/12/2014	20.1	28.2	491	137	163	130.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1523	7.98
19/09/2015	19.6	31.5	626	356	330	264	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1346	7
14/01/2017	17.9	33.3	407	339	203	162.4	0.8	2.97	5.37	0.25	0.018	32.09	37.63	5.54	97.56	0.4	814.9	8.7
11/11/2017	18.0	30.6	553	370	528	422.4	5	3.89	5.73	0.38	0.018	28.87	37.4	8.53	66.84	0.56	801.6	7
22/12/2018	18.5	39.3	612	371	220	176	10	6.31	7.91	0.38	0.021	49.86	63.74	13.88	107	1.84	-	-
dic-19	21	23.23	653	408	35	28	3	10.99	11.47	0.35	0.018	62.23	71.77	9.54	225.53	0.72	-	-
nov-20	-	26.42					29	4.85	7.56	0.35	0.018	30.69	78.2	47.51	151.27	1.6	-	-

Nota. Elaboración propia, a partir de los datos brindados por la empresa Red Vital Paipa.

La composición química doméstica del agua residual que se muestra en la Tabla 1 representa lo que son principalmente fertilizantes, detergentes que contienen nitrógeno y fosfato, excrementos, grasas y aceites. De esta manera se justifica la presencia de sulfatos y nitrógenos porque provienen de los detergentes, excrementos y en algunas ocasiones de los fertilizantes.

La DQO es empleada para medir el contenido de materia orgánica en aguas residuales, mientras que la DBO es la cantidad de oxígeno necesario para descomponer esta materia orgánica mediante la acción de microorganismos aerobios presentes en el agua.

Para saber si un agua es biodegradable se deben tener en cuenta las siguientes relaciones:  $DBO/DQO < 0.2$ : Agua poco biodegradable  $DBO/DQO < 0,4$ : Agua Biodegradable  $DBO/DQO > 0,4$ : Agua muy Biodegradable, al realizar dichas operaciones con los datos obtenidos se puede decir que, dicha agua se puede depurar a través del tratamiento biológico debido a que el agua es biodegradable.

**Tabla 2**

*Caracterizaciones del agua residual, efluente*

Parámetro/Fecha	Temperatura (°C)	Q aforo (L/s)	DQO total (mgO <sub>2</sub> /L)	DBO5 Total (mgO <sub>2</sub> /L)	SST (mgSS/L)	SSV (mgSS/V/L)	Sólidos Sedimentables (SS) (mLSS/L)	Ortofosfatos (mP-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /L)	Fosforo total (mgP/L)	Nitratos (mgN03 <sup>-</sup> /N/L)	Nitritos(mgN02 <sup>-</sup> /N/L)	Nitrogeno Amoniacal (mgNH <sub>3</sub> -N/L)	Nitrogeno Total (mgN/L)	Nitrógeno Orgánico (mgNorg/L)	Sulfatos (mgS04 <sup>2-</sup> /L)	Sulfuros (mgS <sup>2-</sup> /L)	Conductividad (µs/cm)	pH
9/11/2012	17.18	24.6	25	6	9	7.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1630	7.01
22/02/2014	19.76	23.73	30	8	9	7.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1288	7.67
23/12/2014	20.6	28.2	101	39	12	9.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1731	7.86
19/09/2015	19.1	31.5	132	41	32	25.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1328	7.13
14/01/2017	17.9	9.69	77	78	23	18.4	0.1	17.53	6.83	0.38	0.12	1.82	5.08	3.26	116	0.4	-	-
11/11/2017	18.3	31.6	46	12	11.51	9.208	0.1	3.13	5.8	8.32	0.06	6.29	8.23	1.94	96.35	0.4	653.8	6.8
22/12/2018	18.7	34.8	47	46	-	-	4	2.32	2.5	2.91	1.34	15.88	29.05	13.17	160	0.02	-	-
dic-19	21.3	25.87	57	44	31	24.8	1.3	7.82	8.19	1.51	0.13	28.96	31.36	2.4	234	0.1	-	-
nov-20	-	26.9	40	30	12	9.6	0.6	2.35	3.9	1.24	0.748	18.93	21.05	2.12	336.46	0.1	-	-

Nota. Elaboración propia, a partir de los datos brindados por la empresa Red Vital Paipa.

En cuanto a los valores de la Tabla 2, se puede observar que se redijeron de manera significativa después del tratamiento, lo que nos indica que se está llevando a cabo de forma adecuada.

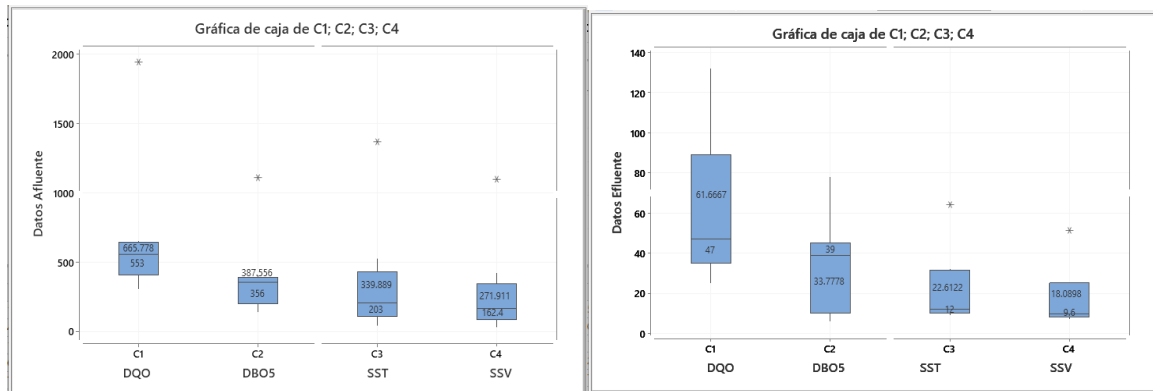
### *Prueba de normalidad*

Este análisis estadístico se realizó con el software Minitab. Esta es una herramienta estadística de fácil manejo, enfocada al análisis de datos. En este caso, solo se va a realizar el análisis de los parámetros que se van a introducir en el Consejo del afluente de GPS-X, los cuales son: DQO total, DBO<sub>5</sub> total, Sólidos Suspendidos Totales, Nitrógeno Amoniacal y Nitrógeno Total.

En primer lugar, se introdujeron todas las caracterizaciones tanto de afluente como efluente que fueron suministradas por la empresa Red Vital y así poder realizar el correspondiente análisis estadístico el cual se muestra a continuación:

### **Figura 14**

*Cajas, DQO (mgO<sub>2</sub>/L), DBO<sub>5</sub> (mgO<sub>2</sub>/L), SST (mgSST/L) y SSV (mg SSV/L), izquierda en afluente y derecha en efluente*

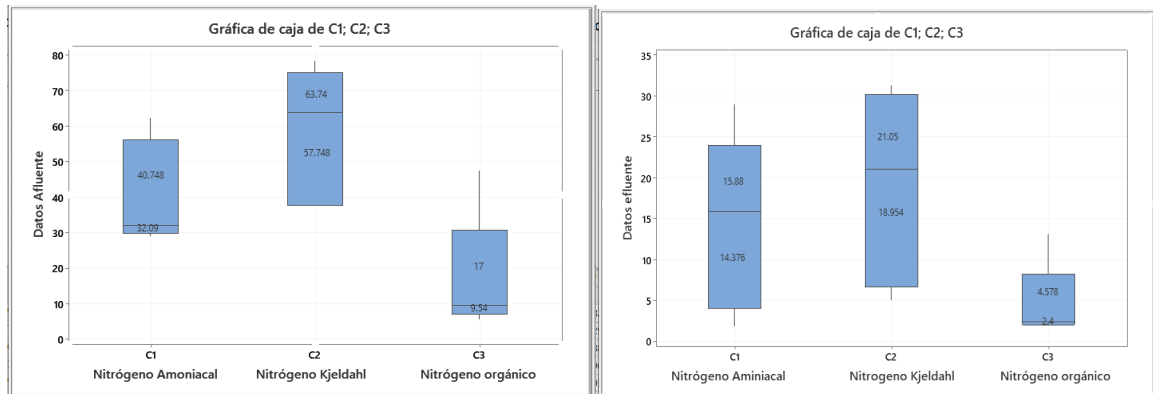


Fuente: Autoras.

De acuerdo a la Figura 14, se realizaron los diagramas de cajas de los parámetros DQO, DBO<sub>5</sub>, SST y SSV, para el afluente y efluente respectivamente. Esto para visualizar la distribución, por medio del Rango Intercuartílico (RIC) y la media y mediana.

**Figura 15**

*Cajas, Nitrógeno Amoniacaal ( $\text{mgNH}_3\text{-N/L}$ ), Nitrógeno Kjeldahl Total ( $\text{mgN/L}$ ) y Nitrógeno Orgánico ( $\text{mgNorg/L}$ ), izquierda en afluente y derecha en efluente*



Fuente: Autoras.

Como se puede observar en la Figura 15, se los diagramas de cajas de los parámetros Nitrógeno Amoniacaal, Nitrógeno Kjeldahl total y Nitrógeno orgánico para el afluente y efluente respectivamente. Esto para visualizar la distribución, por medio del Rango Intercuartílico (RIC), la media y mediana.

Con base en los diagramas de cajas, se calculan los Límites Inferiores para Valores Atípicos (LL) y Límites Superiores para Valores Atípicos (UL), ambos por sus siglas en inglés. Se pueden calcular con las siguientes ecuaciones:

$$LL = Q_1 - 1.5 * RIC$$

$$UL = Q_3 + 1.5 * RIC$$

Dónde:

$Q_1$  → Corresponde al primer cuartil, es decir, el 25% de los datos tienen un valor que es igual o menor al valor del  $Q_1$ .

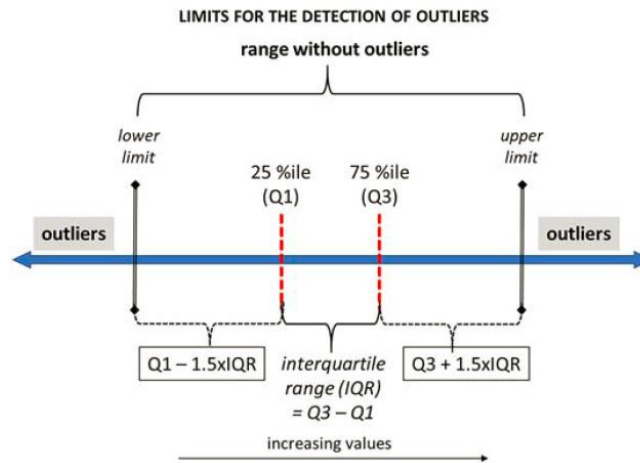
$Q_3$  → Corresponde al tercer cuartil, significa que el 75% de los datos tienen un valor menor o igual al valor del  $Q_3$ .

RIC → Es el Rango Intercuartílico, en otras palabras, el 50% de los datos está entre  $Q_3$  y  $Q_1$ .



**Figura 16**

*Esquema de detección de valores atípicos basado en el rango intercuartílico (RIC)*



Fuente: Von Sperling, M., Verbyla, M. E., y Oliveira, S. M. (2020). *Assessment of Treatment Plant Performance and Water Quality Data: A Guide for Students, Researchers and Practitioners*. (1st ed.). IWA publishing.

Para el cálculo del RIC, se tiene en cuenta los diagramas de cajas, y se localizan los  $Q_1$  y  $Q_3$  de cada figura. Por ejemplo, en la Figura 16, para la DQO total, el  $Q_1=404$  mgO<sub>2</sub>/L y el  $Q_3=622$  mgO<sub>2</sub>/L y el RIC=218 mgO<sub>2</sub>/L (Ver tabla 3). Después se procedió a calcular los Límites Superiores e Inferiores para identificar los valores atípicos, así:

$$LL = Q_1 - 1.5 * RIC$$

$$LL = 404 - (1.5 * 218)$$

$$LL = 77$$

$$UL = Q_3 + 1.5 * RIC$$

$$UL = 622 + (1.5 * 218)$$

$$UL = 949$$

**Tabla 3***Análisis de valores atípicos con el Rango Intercuartílico para el afluente*

	<b>DQO total (mgO<sub>2</sub>/L)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> Total (mgO<sub>2</sub>/L)</b>	<b>SST (mgSST/L)</b>	<b>SSV (mgSSV/L)</b>	<b>Nitrógeno Amoniacal (mgNH<sub>3</sub>- N/L)</b>	<b>Nitrógeno Kjeldahl Total (mgN/L)</b>	<b>Nitrógeno Orgánico (mgNorg./L)</b>	<b>Nitrógeno Orgánico Logarítmico (mgNorg./L)</b>
Q <sub>1</sub>	404	172	70	100	30.69	37.63	8	0.85
Q <sub>3</sub>	622	371	330	350	56.1	78.2	30	1.4
RIC	218	199	260	250	25.41	40.57	22	0.55
LL	77	-126.5	-320	-275	-7.4	-23.2	-25.0	0.0
UL	949	669.5	720	725	94.2	139.1	63.0	2.2

Fuente: Autoras.

Se concluye que para la DQO total, el límite inferior es de 77 mgO<sub>2</sub>/L, es decir, valores menores a este corresponden a datos atípicos. De la misma manera, el límite superior es de 949 mgO<sub>2</sub>/L, en otras palabras, los valores mayores a este son valores atípicos. Para el caso, de la DQO total, DBO<sub>5</sub>, SST y SSV se eliminaría solo un dato que sería el muestreo realizado el 27 de noviembre de 2020, porque estos datos se encuentran fuera del RIC, mientras que, para el Nitrógeno Amoniacal, Nitrógeno Kjeldahl Total y Nitrógeno Orgánico, no se elimina ningún dato, ya que todos se encuentran dentro del RIC.

Se hizo el mismo análisis para el efluente (Ver Tabla 4), y los únicos datos a eliminar son de la caracterización realizada el día 22 de diciembre del 2018 para los parámetros de SST y SSV, debido a que no están dentro del RIC. Las demás variables están dentro del rango.

**Tabla 4***Análisis de valores atípicos con el Rango Intercuartílico para el efluente*

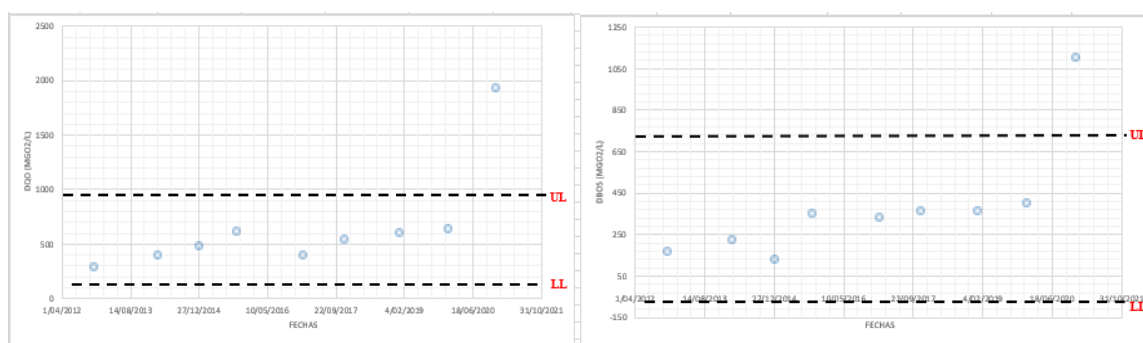
	DQO total (mgO <sub>2</sub> /L)	DBO <sub>5</sub> Total (mgO <sub>2</sub> /L)	SST (mgSST/L)	SSV (mgSSV/L)	Nitrógeno Amoniacal (mgNH <sub>3</sub> - N/L)	Nitrógeno Kjeldahl Total (mgN/L)	Nitrógeno Orgánico (mgNorg./L)	Nitrógeno Orgánico Logarítmico (mgNorg./L)
Q <sub>1</sub>	30	12	12	10	4	7	3	0.3
Q <sub>3</sub>	90	46	32	22	24	30	8	0.8
RIC	60	34	20	12	20	23	5	0.5
LL	-60	-39	-18	-8	-26.0	-27.5	-4.5	-0.5
UL	180	97	62	40	54.0	64.5	15.5	1.6

Fuente: Autoras.

Realizado lo anterior, se procedió a hacer las gráficas de cada uno de los parámetros analizados y con ello determinar la línea de tendencia de los mismos como se puede ver a continuación:

**Figura 17**

*Línea de tendencia de DQO (mgO<sub>2</sub>/L) a la izquierda y DBO<sub>5</sub> (mgO<sub>2</sub>/L) a la derecha, con los límites superiores e inferiores en el afluente*



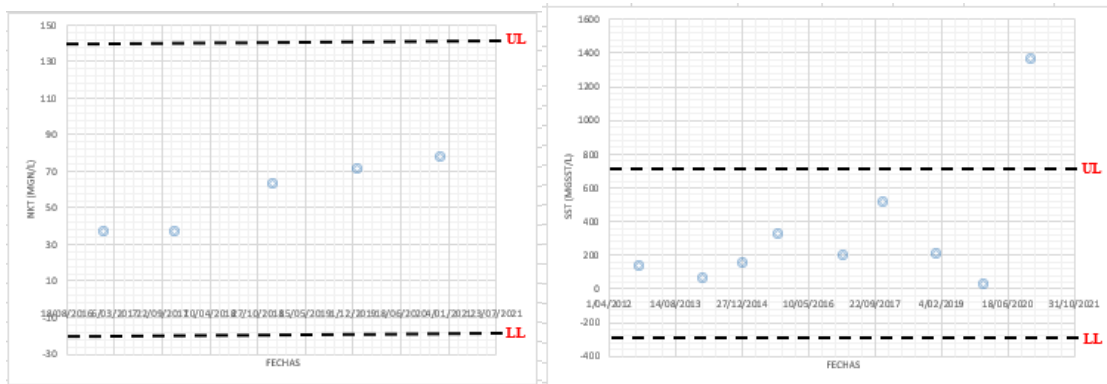
Fuente: Autoras.

En la Figura 17, se muestran los datos de la DQO y DBO<sub>5</sub> medidos en campo en el afluente de la planta que quedan por fuera del límite superior y límite inferior, los cuales hay

que eliminar de la base de datos, para que no haya una afectación en la modelación, en este caso no se tienen en cuenta dos de estos valores, tanto para la DQO como para la DBO<sub>5</sub>.

**Figura 18**

*Línea de tendencia SST (mgSST/L) a la izquierda y SSV (mgSSV/L) a la derecha, con los límites superiores e inferiores en el afluyente*

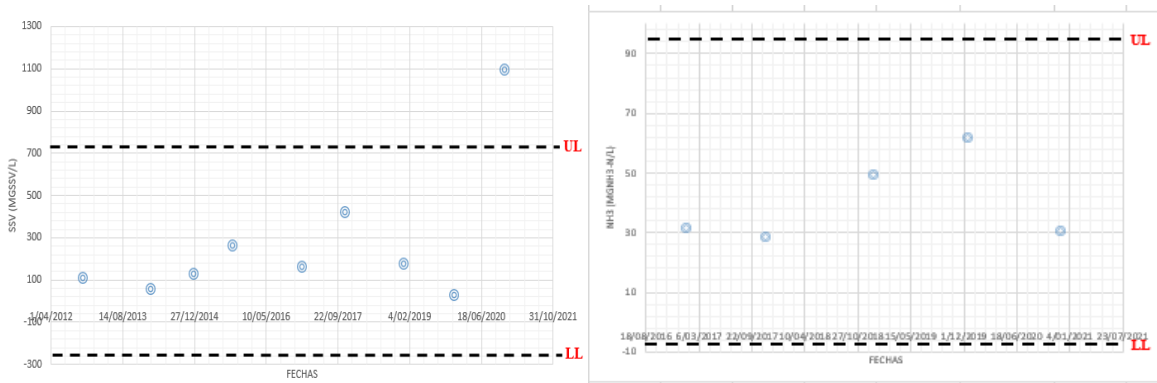


Fuente: Autoras.

En la Figura 18, se tiene en cuenta el mismo análisis anterior, pero en este caso para los SST y SSV también medidos en campo, cuyo dato a eliminar en la base de datos se presenta en los SSV.

**Figura 19**

*Línea de tendencia Nitrógeno Amoniacal (mg NH<sub>3</sub>-N/L) a la izquierda y Nitrógeno Kjeldahl Total (mg N/L) a la derecha, con los respectivos límites superiores e inferiores en el afluyente*

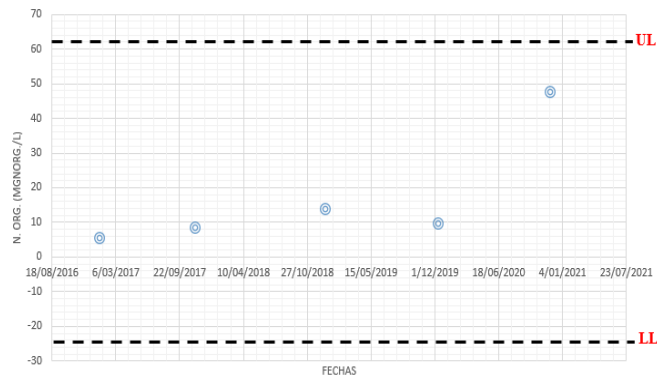


Fuente: Autoras.

En la Figura 19, se presentan los diagramas de los rangos intercuartílicos del Nitrógeno Amoniacal y Nitrógeno Kjeldahl Total medidos en campo.

### Figura 20

*Línea de tendencia del Nitrógeno Orgánico (mgNorg/L), con los respectivos límites superiores e inferiores en el afluente*

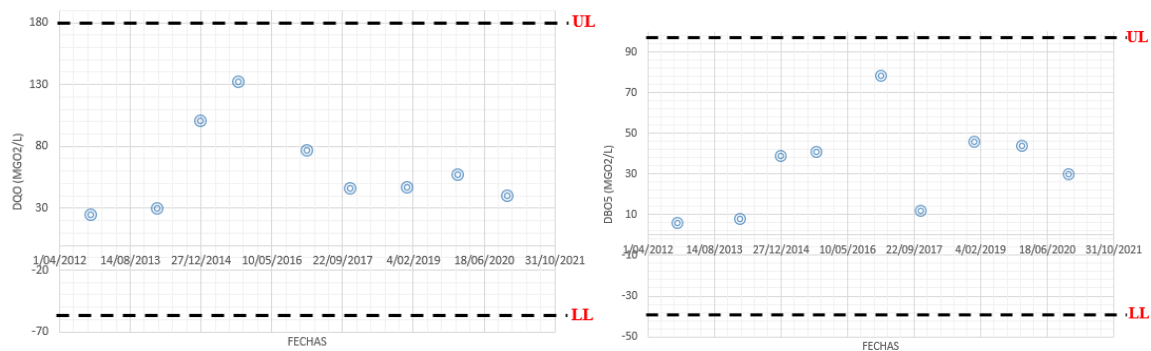


Fuente: Autoras.

En la Figura 20, se presenta el diagrama de los rangos intercuartílicos del Nitrógeno Orgánico medidos en campo, donde se eliminará un dato en los datos del Nitrógeno Amoniacal.

### Figura 21

*Línea de tendencia DQO (mgO<sub>2</sub>/L) a la izquierda y DBO<sub>5</sub> (mgO<sub>2</sub>/L) a la derecha, con los respectivos límites superiores e inferiores en el efluente*

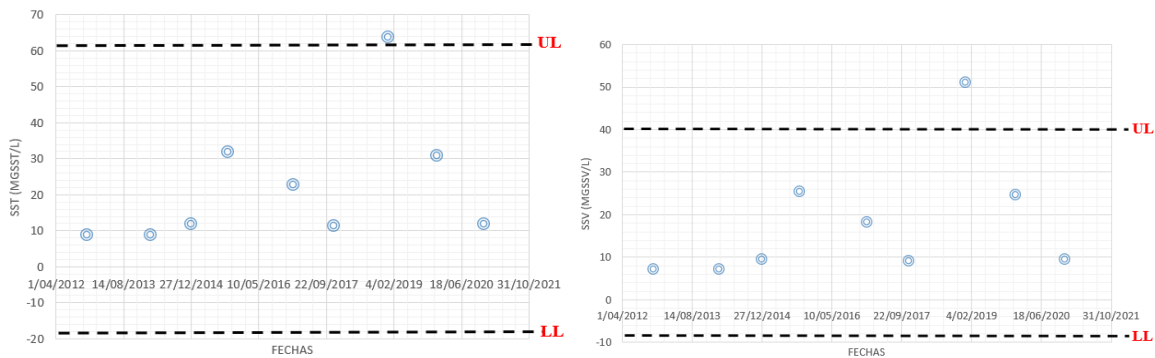


Fuente: Autoras.

En la Figura 21, se muestran los datos de la DQO y DBO<sub>5</sub> medidos en campo en el efluente de la planta dentro de su rango intercuartílico, y como se puede observar los dos parámetros se encuentran óptimos para la modelación.

### Figura 22

*Línea de tendencia SST (mgSST/L) a la izquierda y SSV (mgSSV/L) a la derecha, con los respectivos límites superiores e inferiores en el efluente*

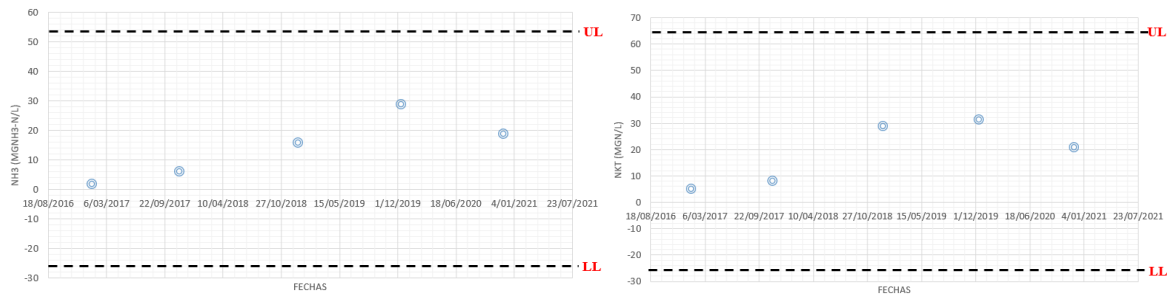


Fuente: Autoras.

En la Figura 22, se exponen los valores de SST y SSV medidos en campo, y por medio de estos diagramas se concluye que se deben eliminar dos datos de la base de datos, uno de SST y otro de SSV.

### Figura 23

*Línea de tendencia Nitrógeno Amoniacal (mgNH<sub>3</sub>-N/L) a la izquierda y Nitrógeno Kjeldahl Total (mgN/L) a la derecha, con los respectivos límites superiores e inferiores en el efluente*

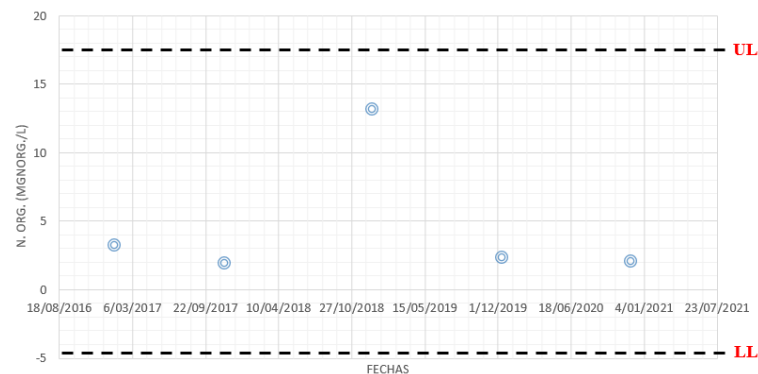


Fuente: Autoras.

En la Figura 23, se presentan los diagramas de los rangos intercuartílicos del Nitrógeno Amoniacal y Nitrógeno Kjeldahl Total medidos en campo, y se concluye que los datos se encuentran dentro del RIC, por lo tanto, pueden ser utilizados en la modelación.

#### Figura 24

*Línea de tendencia del Nitrógeno Orgánico (mgNorg/L), con los respectivos límites superiores e inferiores en el efluente*



Fuente: Autoras.

En la Figura 24, se presenta el diagrama de los rangos intercuartílicos del Nitrógeno Orgánico medidos en campo, y se concluye que los datos se encuentran dentro del RIC, por lo tanto, pueden ser utilizados en la modelación.

Adicionalmente se realizó el test de normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk, también encontrado en Minitab como Ryan Joiner, para estudiar si las variables corresponden a una distribución de probabilidad normal.

El test de normalidad, se efectuó con un “p-valor” (nivel de significancia) del 5% (0.05), lo que implica un nivel de confianza del 95% (0.95), la interpretación del “valor p” en la prueba de Shapiro-Wilk es la siguiente:

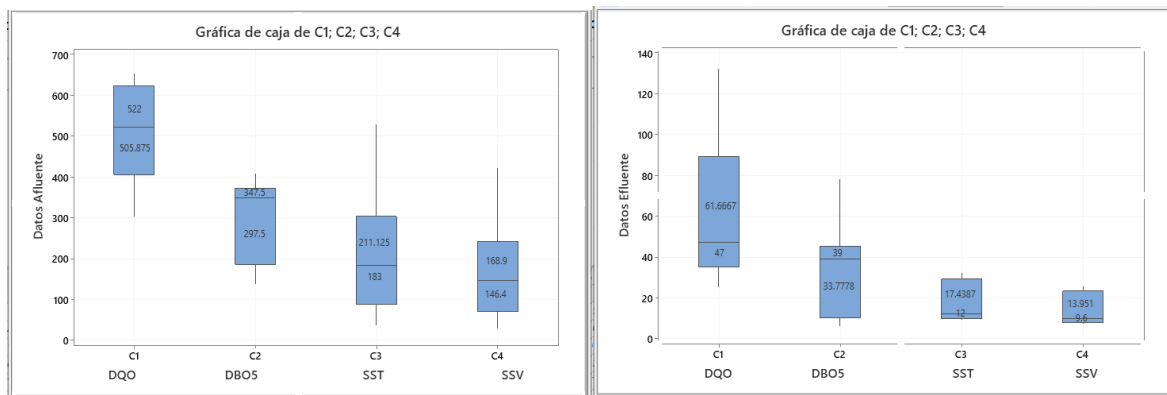
**Si  $p < 0.05$ :** la distribución de los datos es significativamente diferente de una distribución normal.

**Si  $p \geq 0.05$ :** la distribución de los datos no es significativamente diferente de una distribución normal. Valores p más altos significan que se tiene menos evidencia de que la distribución es significativamente diferente de una distribución normal.

Una vez identificados los datos atípicos, se procedió a eliminarlos ya que generaban una afectación en la distribución normal de los mismos. Los datos modificados se muestran a continuación:

**Figura 25**

*Cajas, DQO (mgO<sub>2</sub>/L), DBO<sub>5</sub> (mgO<sub>2</sub>/L), SST (mgSST/L) y SSV (mgSSV/L), izquierda en afluente y derecha en efluente*

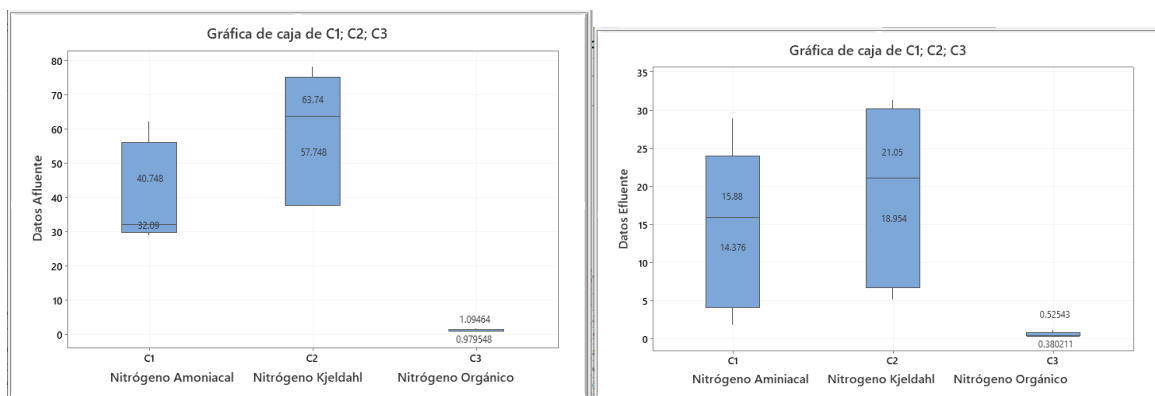


Fuente: Autoras.

Como se puede observar en la Figura 25, son los datos de las variables DQO, DBO<sub>5</sub>, SST y SSV y con estos se realizó el análisis de normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk a cada una de las variables.

**Figura 26**

*Nitrógeno Amoniacal (mgNH<sub>3</sub>-N/L), Nitrógeno Kjeldahl Total (mgN/L) y Nitrógeno Orgánico (mgNorg/L), izquierda en afluente y derecha en efluente*



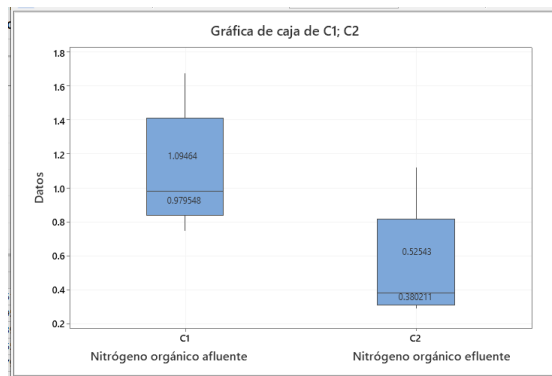
Fuente: Autoras.



Por otro lado, se realizó el análisis de normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk con los parámetros de Nitrógeno Amoniacal y Nitrógeno Kjeldahl Total como se puede observar en la Figura 26 pero teniendo en cuenta que no se eliminó ningún dato.

**Figura 27**

*Nitrógeno Orgánico (mgNorg/L), en el afluente y efluente*



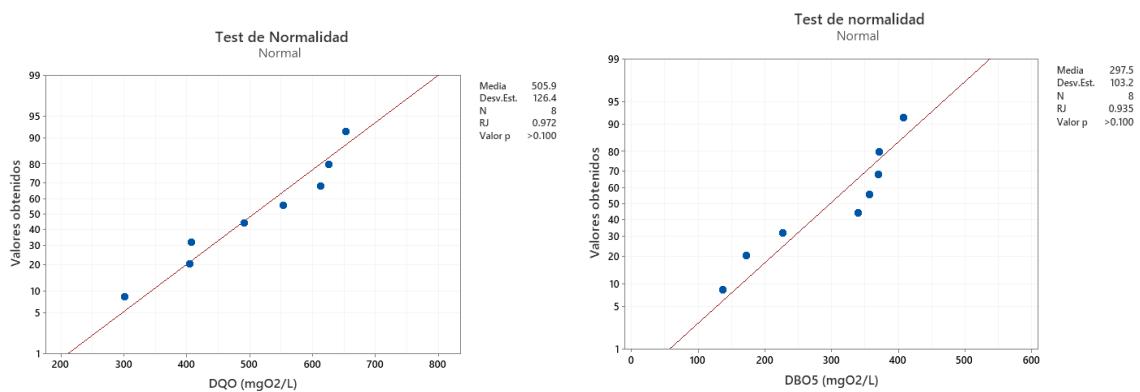
Fuente: Autoras.

Finalmente, se realizó la misma prueba de normalidad para la variable Nitrógeno orgánico (Ver Figura 27) teniendo en cuenta que tampoco se eliminó ningún dato.

Las pruebas de normalidad realizadas a las variables de importancia en este proyecto se muestran a continuación:

**Figura 28**

*Prueba de normalidad DQO (mgO<sub>2</sub>/L) a la izquierda y DBO<sub>5</sub> (mgO<sub>2</sub>/L) a la derecha, en el afluente*

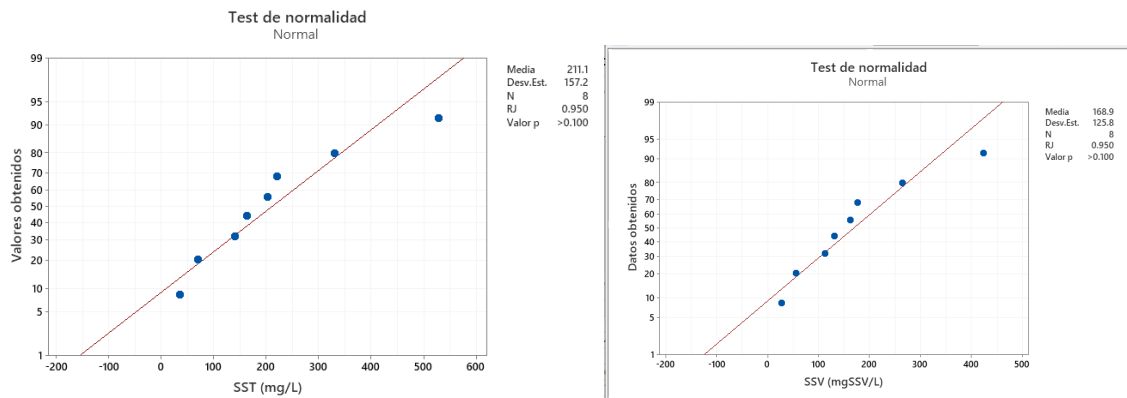


Fuente: Autoras.

En el caso de la DQO, DBO<sub>5</sub>, (Ver Figura 28), arrojaron valores de “p-valor” de  $p > 0.100$ , los cuales son datos mayores a 0.05, por ende, se puede decir que los datos corresponden a una distribución de probabilidad normal.

### Figura 29

Prueba de normalidad SST (mgSST/L) a la izquierda y SSV (mgSSV/L) a la derecha, en el afluyente

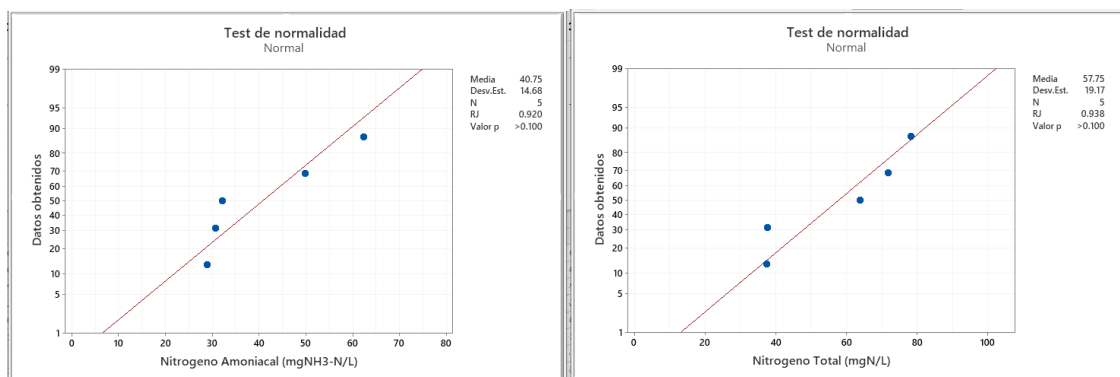


Fuente: Autoras.

Como se puede observar en la Figura 29, en el caso de los SST, y SSV en el afluyente arrojaron valores de “p-valor” de  $p > 0.100$ , los cuales son datos mayores a 0.05, por ende, se puede decir que los datos corresponden a una distribución de probabilidad normal.

### Figura 30

Prueba de normalidad Nitrógeno Amoniacoal (mgNH<sub>3</sub>-N/L) a la izquierda y Nitrógeno Kjeldahl Total (mgN/L) a la derecha, en el afluyente

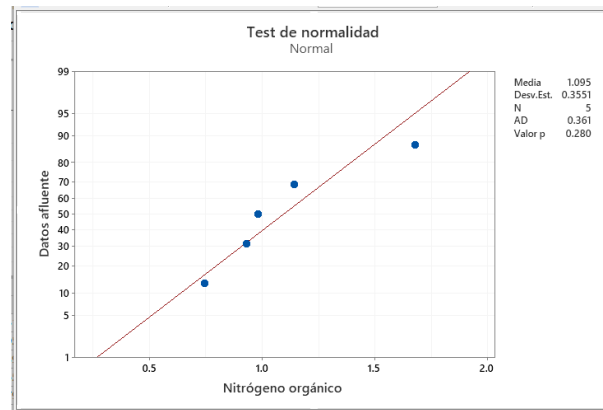


Fuente: Autoras.

Como se puede observar en la Figura 30, en el caso del Nitrógeno Amoniacal y Nitrógeno Kjeldahl Total en el afluente, arrojaron valores de “p-valor” de  $p > 0.100$ , los cuales son datos mayores a 0.05, por ende, se puede decir que los datos corresponden a una distribución de probabilidad normal.

### Figura 31

*Prueba logarítmica de normalidad Nitrógeno Orgánico (mgNorg/L), en el afluente*



Fuente: Autoras.

El Nitrógeno Orgánico recibió un tratamiento especial (Ver Figura 31), ya que, se debió realizar una distribución normal logarítmica, por ello se realizó el cálculo de la media geométrica y la desviación estándar geométrica para finalmente sacar el promedio de los datos del Nitrógeno Orgánico en el afluente. En este caso el “p-valor” fue de  $p > 0.280$  lo que indica que es una distribución logarítmica normal.

A continuación, en la Tabla 5, se muestra el cálculo de la distribución normal realizada para el Nitrógeno Orgánico:

**Tabla 5**

*Cálculo de la Distribución Logarítmica Normal para el Nitrógeno Orgánico*

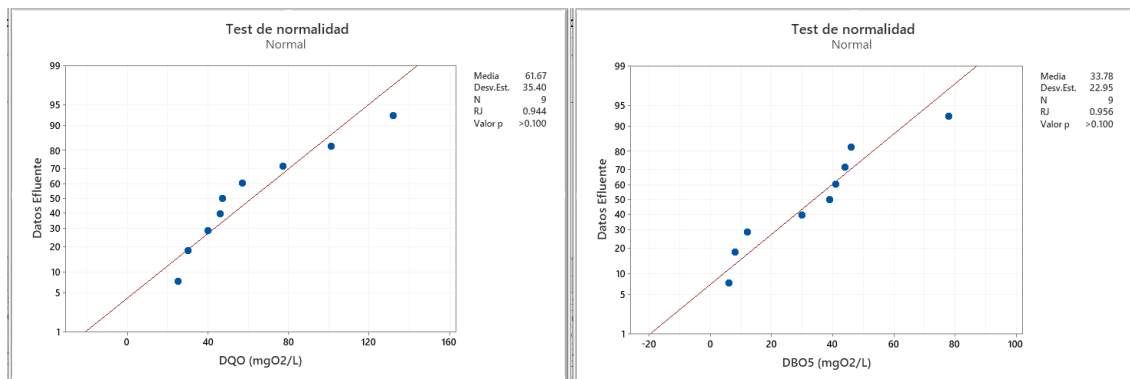
Media Geométrica (Mg)	Desviación Estándar	Desviación Geométrica (Sg)	Intervalo de confianza
2.47	0.36	3.2E-05	0.95

Fuente: Autoras.

Luego, se analizaron las gráficas obtenidas para el efluente y se determinó la distribución de los datos.

**Figura 32**

*Prueba de normalidad DQO (mgO<sub>2</sub>/L) a la izquierda y DBO<sub>5</sub> (mgO<sub>2</sub>/L) a la derecha, en el efluente*

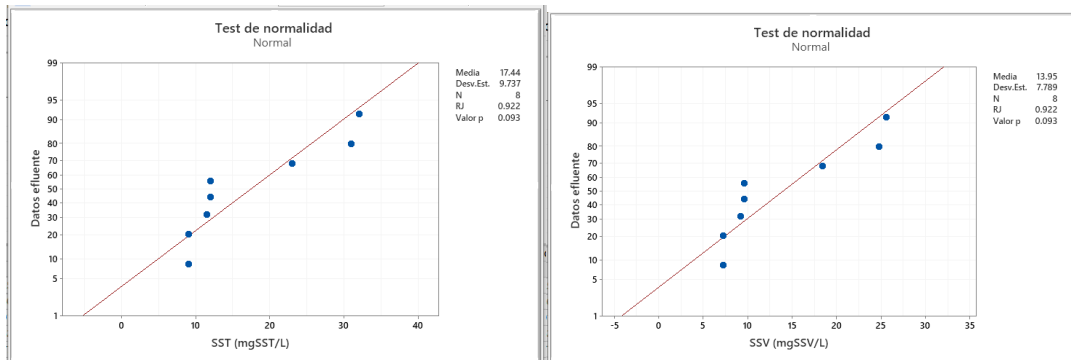


Fuente: Autoras.

Como se puede observar en la Figura 32, la DQO y DBO<sub>5</sub> en el efluente arrojaron valores de “p-valor” de  $p > 0.100$ , los cuales son datos mayores a 0.05, por consiguiente, se puede decir que están dentro de una distribución de probabilidad normal.

**Figura 33**

*Prueba de normalidad SST (mgSST/L) a la izquierda y SSV (mgSSV/L) a la derecha, en el efluente*

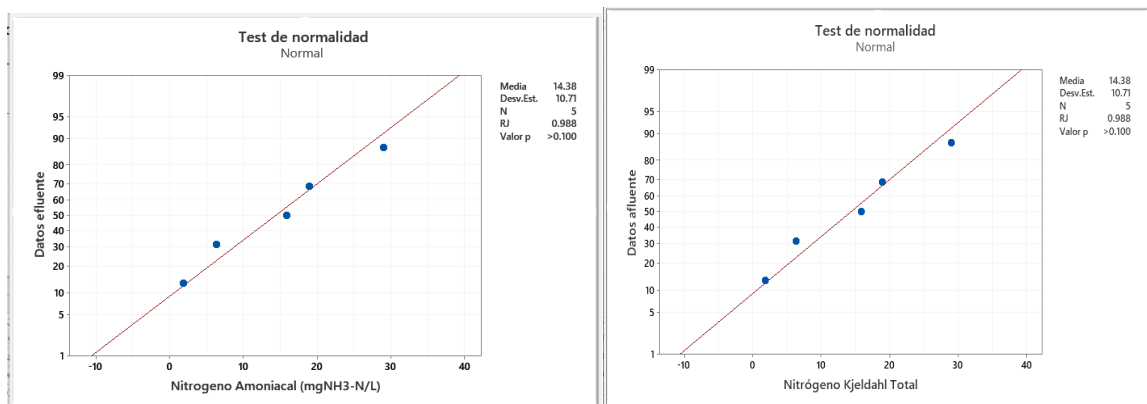


Fuente: Autoras.

En cuanto a los sólidos SST y SSV (ver Figura 33) arrojaron un “p-valor” de  $p > 0.093$  que también corresponden a una distribución de probabilidad normal.

**Figura 34**

*Prueba de normalidad Nitrógeno Amoniacal (mgNH<sub>3</sub>-N/L) a la izquierda, Nitrógeno Kjeldahl Total (mgN/L) a la derecha, en el efluente*

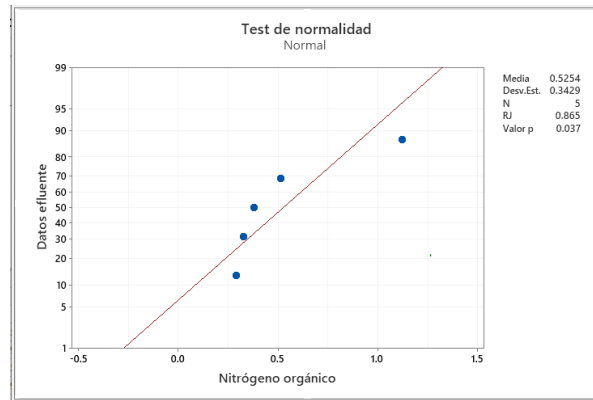


Fuente: Autoras.

Como se puede observar en la Figura 34, el Nitrógeno Amoniacal y Nitrógeno Kjeldahl Total en el efluente arrojaron valores de “p-valor” de  $p > 0.100$ , los cuales son datos mayores a 0.05, por consiguiente, se puede decir que están dentro de una distribución de probabilidad normal.

**Figura 35**

*Prueba logarítmica de normalidad Nitrógeno Orgánico (mgNorg/L) en el efluente*



Fuente: Autoras.

En el caso del Nitrógeno Orgánico (Ver Figura 35) no funcionó ninguna de las pruebas de normalidad por lo que se decidió tomar el promedio de los datos sin ninguna consideración especial.

Después de que se realizó el análisis estadístico y ya eliminados los datos atípicos se procedió a hacer un promedio de los datos finales que se van a introducir en el programa GPS-X. Ver Tabla 6 y 7.

**Tabla 6***Promedio de la caracterización del afluente*

Parámetro/ Fecha	Temperatura (°C)	Q aforo (L/s)	DQO total (mgO <sub>2</sub> /L)	DBO <sub>5</sub> Total (mgO <sub>2</sub> /L)	SST (mgSST/L)	SSV (mgSSV/L)	Sólidos Sedimenta bles (SS) (mLSS/L)	Ortofosfatos (mP-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /L)	Fosforo total (mgP/L)	Nitratos- N (mgNO <sub>3</sub> - N/L)	Nitritos- N (mgNO <sub>2</sub> - N/L)	Nitrogeno Amoniacal (mgNH <sub>3</sub> - N/L)	Nitrogeno Total (mgN/L)	Nitrógeno Orgánico (mgNorg/L)	Sulfatos (mgSO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /L)	Sulfuros (mgS- 2/L)	Conductivid ad (µs/cm)	pH
9/11/2012	17.78	28.12	301	172	140	112	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1715	7.22
22/02/2014	19.82	23	404	227	70	56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1170	7.47
23/12/2014	20.1	28.2	491	137	163	130.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1523	7.98
19/09/2015	19.6	31.5	626	356	330	264	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1346	7
14/01/2017	17.9	33.3	407	339	203	162.4	0.8	2.97	5.37	0.25	0.018	32.09	37.63	5.54	97.56	0.4	814.9	8.7
11/11/2017	18.0	30.6	553	370	528	422.4	5	3.89	5.73	0.38	0.018	28.87	37.4	8.53	66.84	0.56	801.6	7
22/12/2018	18.5	39.3	612	371	220	176	10	6.31	7.91	0.38	0.021	49.86	63.74	13.88	107	1.84	-	-
dic-19	21	23.23	653	408	35	28	3	10.99	11.47	0.35	0.018	62.23	71.77	9.54	225.53	0.72	-	-
nov-20	-	26.42	-	-	-	-	29	4.85	7.56	0.35	0.018	30.69	78.2	47.51	151.27	1.6	-	-
PROMEDIOS	19.1	29.3	505.9	297.5	211.1	168.9	9.6	5.8	7.6	0.3	0.02	40.7	57.7	17.0	129.6	1.0	1228.4	7.6

Nota: Elaboración propia, a partir de los datos brindados por la empresa Red Vital Paipa.

En la Tabla 6, se muestra la caracterización del agua residual en la afluente, la cual se basó en los promedios de los parámetros tales como: Temperatura (°C), Caudal de aforo (L/s), DQO total (mgO<sub>2</sub>/L), DBO<sub>5</sub> total (mgO<sub>2</sub>/L), Sólidos Suspendidos Totales (mgSST/L), Sólidos Suspendidos Volátiles (mgSSV/L), Sólidos Sedimentables (mLSS/L), Ortofosfatos (mP-(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>-L), Fósforo total (mgP/L), Nitratos (mgNO<sub>3</sub>-N/L), Nitritos (mgNO<sub>2</sub>-N/L), Nitrógeno Amoniacal (mgNH<sub>3</sub>-N/L), Nitrógeno Kjeldahl Total (mgN/L), Nitrógeno Orgánico (mgNorg/L) Sulfatos (mg(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>-/L), Sulfuros (mgS<sub>2</sub>/L), Conductividad (µs/cm) y por último pH.

Se debe tener en cuenta que en la base de datos del afluente se eliminaron los datos atípicos de la fecha del 27 de noviembre del 2020 en los parámetros de DQO, DBO<sub>5</sub>, SST y SSV. De igual importancia, se realizó la desviación estándar de la temperatura la cual dio un resultado +- 1.20.

**Tabla 7***Promedio de la caracterización del efluente*

Parámetro/ Fecha	Temperatura (°C)	Q aforo (L/s)	DQO total (mgO <sub>2</sub> / L)	DBO5 Total (mgO <sub>2</sub> / L)	SST (mgSST/ L)	SSV (mgSS V/L)	Solidos Sedimentables (SS) (mLSS/L)	Ortofosfatos (mP-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /L)	Fosforo total (mgP/L )	Nitratos (mgN03- N/L)	Nitritos(mgN 02-N/L)	Nitrogeno Amoniacal 1(mgNH <sub>3</sub> - N/L)	Nitrogeno Total (mgN/L)	Nitrógeno Orgánico (mgNorg/ L)	Sulfatos (mgS042- /L)	Sulfuros (mgS- 2/L)	Conduc tividad (µs/cm)	pH
9/11/2012	17.18	24.6	25	6	9	7.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1630	7.01
22/02/2014	19.76	23.73	30	8	9	7.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1288	7.67
23/12/2014	20.6	28.2	101	39	12	9.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1731	7.86
19/09/2015	19.1	31.5	132	41	32	25.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1328	7.13
14/01/2017	17.9	9.69	77	78	23	18.4	0.1	17.53	6.83	0.38	0.12	1.82	5.08	3.26	116	0.4	-	-
11/11/2017	18.3	31.6	46	12	11.51	9.208	0.1	3.13	5.8	8.32	0.06	6.29	8.23	1.94	96.35	0.4	653.8	6.8
22/12/2018	18.7	34.8	47	46	-	-	4	2.32	2.5	2.91	1.34	15.88	29.05	13.17	160	0.02	-	-
dic-19	21.3	25.87	57	44	31	24.8	1.3	7.82	8.19	1.51	0.13	28.96	31.36	2.4	234	0.1	-	-
nov-20	-	26.9	40	30	12	9.6	0.6	2.35	3.9	1.24	0.748	18.93	21.05	2.12	336.46	0.1	-	-
PROMEDIOS	19.1	26.3	61.7	33.8	17.4	14.0	1.2	6.6	5.4	2.9	0.5	14.4	19.0	4.6	188.6	0.2	1326.2	7.3

Nota: Elaboración propia, a partir de los datos brindados por la empresa Red Vital Paipa.

También, es importante aclarar que en la base de datos del efluente (Ver Tabla 7) se eliminaron los datos atípicos de la fecha del 22 de diciembre del 2018 en los parámetros de SST y SSV. Esto, con la finalidad de hacer más adelante la comparación con los resultados de la modelación. Asimismo, la desviación estándar de la temperatura tiene un resultado de +- 1.3.

Como un segundo referente se toma los datos suministrados por Metcalf y Eddy (2014), en su Tabla 3.18, “la cual muestra la composición típica del agua residual doméstica sin tratamiento” (p. 249). De acuerdo con esta, se hace la comparación con el promedio de los valores del afluente de la planta teniendo en cuenta que no se le ha eliminado ningún dato, con el fin de determinar si los datos atípicos encontrados anteriormente están por fuera de estos valores generales, concluyendo que solo se encuentran fuera de lo normal los constituyentes Nitratos y Nitritos (Ver Tabla 8).



**Tabla 8***Comparación con valores típicos de aguas residuales domésticas*

<b>Constituyente</b>	<b>Unidades</b>	<b>Promedio (teniendo en cuenta los datos atípicos)</b>	<b>Valor Mín.</b>	<b>Valor Máx</b>
DQO total	mg /L	665.8	339	1016
DBO5 Total	mg /L	387.6	133	400
SST	mg /L	339.9	130	389
SSV	mg /L	211.125	101	304
<b>Sólidos</b>				
Sedimentables	mg /L	9.6	8	23
Nitratos- N	mg /L	0.3	0	0
Nitritos- N	mg /L	0.02	0	0
<b>Nitrógeno</b>				
Orgánico	mg /L	17	10	29

Fuente: Metcalf y Eddy. (2014). *Wastewater Engineering, Treatment and Resource Recovery*. (5th ed.). Mc Graw-Hill Education.

Al hacer el cotejo de los datos se debe hacer la discriminación de datos erróneos o atípicos que pudieron presentarse por diversos factores, tales como: resultados de calibraciones y ajustes efectuados en los parámetros de operación, desarrollo e historia de los servicios realizados a los equipos, cambio en las condiciones meteorológicas, y los niveles de otros contaminantes en el mismo período (Barreto et al., 2010, p. 23).

### **Modelo del sistema basado en el modelo ASM1 de procesos biológicos al sistema de tratamiento del municipio de Paipa**

En el capítulo mostrado a continuación se hace un reconocimiento al software GPS-X para luego utilizarlo en la modelación de las condiciones y operaciones actuales de la PTAR, además de ello, verificar el volumen de los reactores biológicos con el software Capdetworks, con el fin de identificar las falencias existentes en el sistema, finalmente, se analiza la calidad del agua obtenida en el efluente del modelo por medio de las librerías Carbono- Nitrógeno.

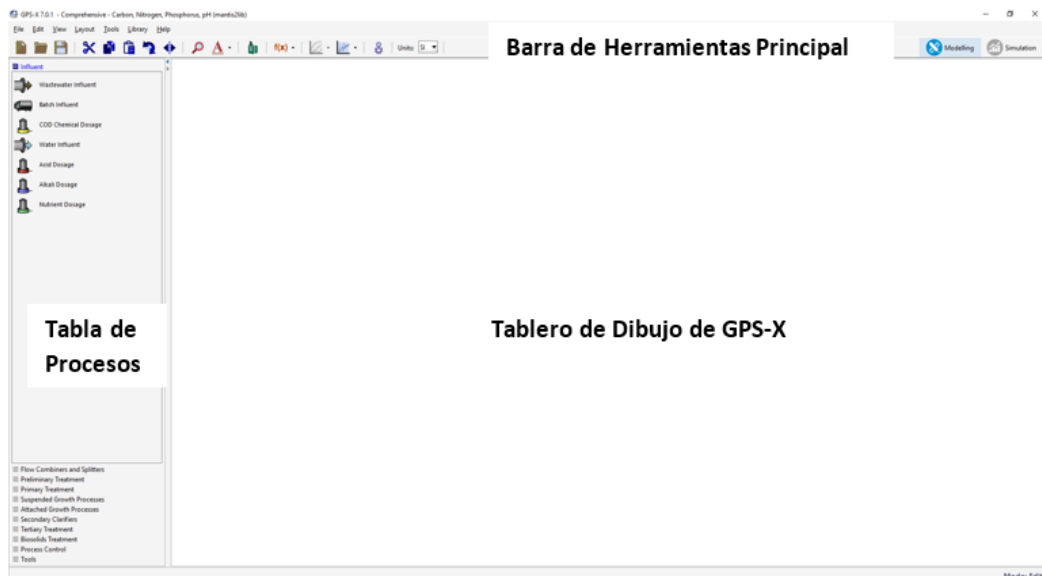
Con la base de datos, la caracterización del agua residual cruda con propósitos de modelación se realizó con la ayuda del consejero del afluente de GPS-X. Esta herramienta permite el fraccionamiento orgánico completo y riguroso de las aguas residuales del afluente utilizando los parámetros de: DQO, DBO, Sólidos Suspendidos Totales (SST), Nitrógeno Amoniacal, Nitrógeno Total y unos pocos coeficientes estequiométricos. Los parámetros analíticos convencionales tales como la DBO y la DQO, utilizados para cuantificar las concentraciones de compuestos orgánicos en aguas residuales, no pueden diferenciar directamente entre la parte fácilmente biodegradable, lentamente biodegradable y no biodegradable. La ventaja del consejero del afluente es que proporciona una base consistente para la descripción del proceso del lodo activado, incluidas las relaciones entre el sustrato, la biomasa y el aceptor de electrones.

Finalmente, los parámetros requeridos por el software fueron: DBO5, DQO total, Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV), nitrógeno amoniacal, Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) ICV, IVT y fbod.

#### **Aplicación del Consejero del Afluente en GPS-X**

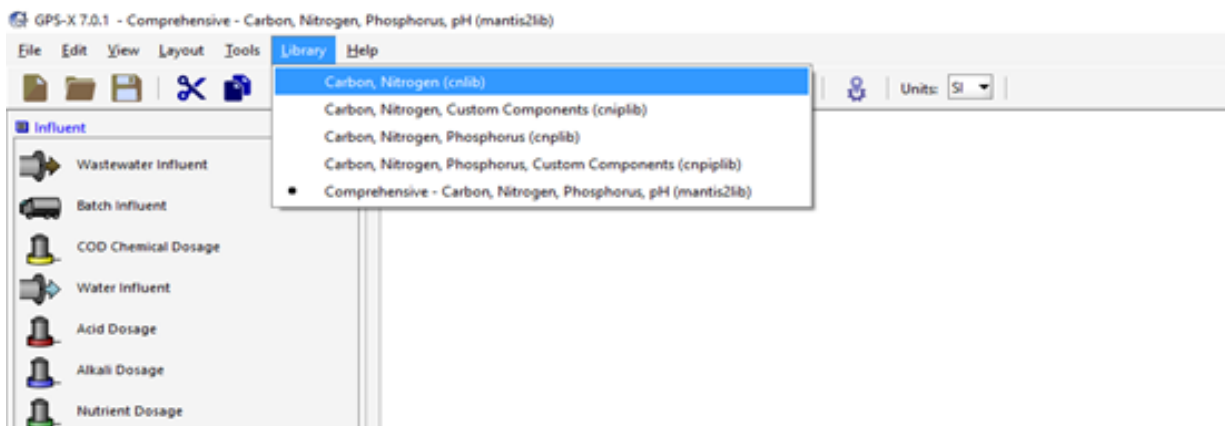
Realizado lo anterior, se presenta el paso a paso de la aplicación del consejero del afluente GPS-X, esta aplicación cuenta con un modelado multipropósito para la simulación de procesos biológicos de aguas residuales.

- Se abrió el programa, en el cual se mostrará la interfaz visual que se observa en la Figura 36, la cual se divide en tres áreas de trabajo: barra de herramientas principales, tabla de procesos y tablero de dibujo.

**Figura 36***Interfaz GPS-X*

Fuente: Autoras.

- En la barra de herramientas principal ubicada en la parte superior de la ventana; Se encuentra el menú principal donde están ubicadas las distintas opciones de bibliotecas de modelado, para este caso se utilizó “carbono-nitrógeno” (CNLIB), esta depende del modelo ASM1 que se está utilizando para realizar la simulación.

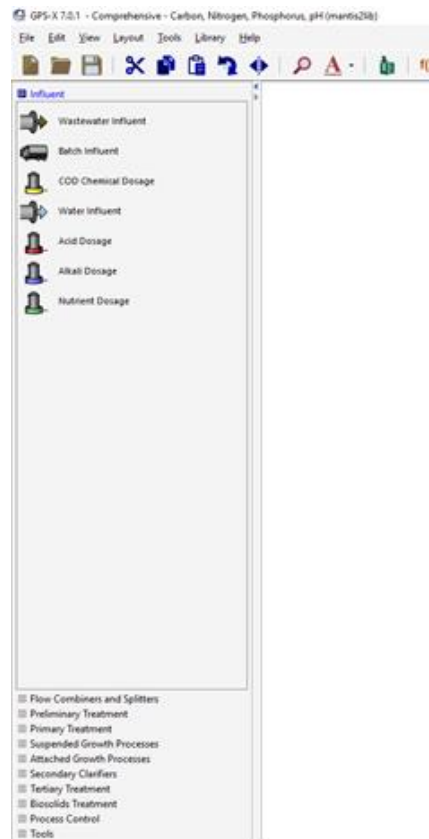
**Figura 37***Librería Carbono- Nitrógeno*

Fuente: Autoras.

- En la tabla de procesos que se encuentra al lado izquierdo de la ventana de GPS-X, se observan los procesos que se realizan en cada unidad para construir un modelo de una planta de tratamiento de aguas residuales. Cada icono se identifica por el nombre del proceso.

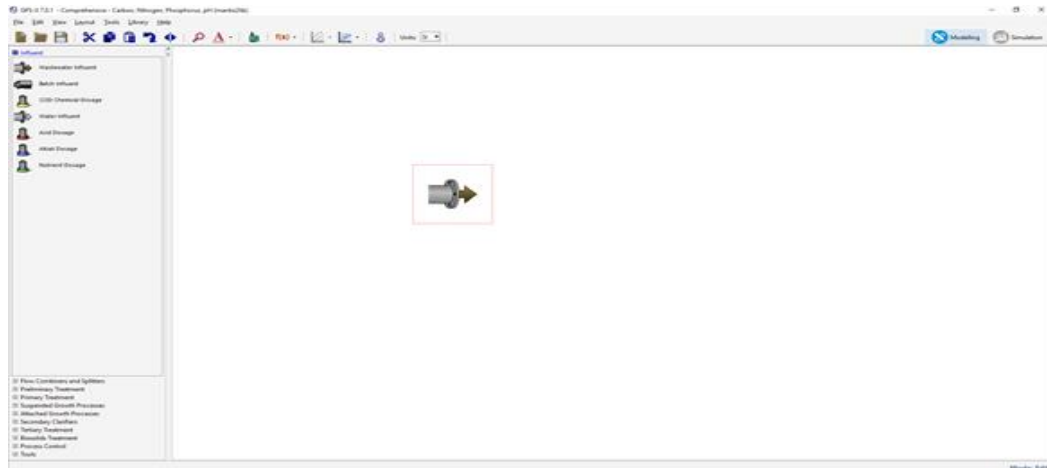
### Figura 38

#### Tabla de procesos



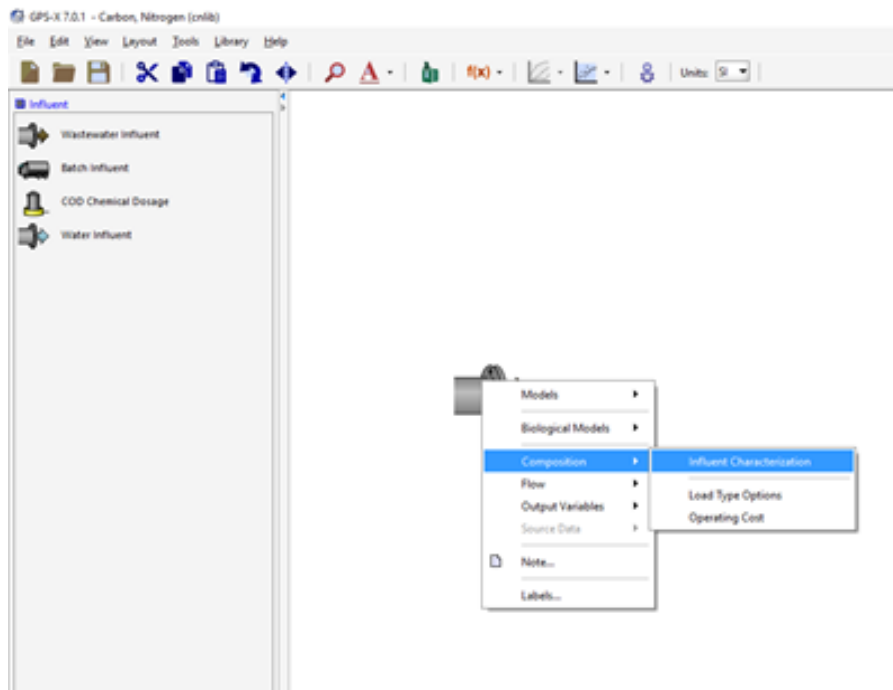
Fuente: Autoras.

- Se seleccionó el afluente (influent), el icono de “wastewater influent” haciendo clic con el botón izquierdo del mouse y manteniendo presionado el botón, se arrastra el icono hasta el tablero de dibujo y se podrá observar en el tablero de dibujo (Ver Figura 39).

**Figura 39***Construcción del modelo*

Fuente: Autoras.

- Sobre el icono “wastewater influent” se seleccionó la opción “composition” y luego “influent characterization”, haciendo clic derecho sobre el icono como se muestra en la Figura 40, para insertar las condiciones iniciales del modelo.

**Figura 40***Ruta consejero del afluente*

Fuente: Autoras.

- A continuación, aparece la ventana consejero del afluente, donde se encuentran los datos de entrada, las variables de estado y las variables compuestas (Ver Figura 41).

Figura 41

Ventana del consejero del afluente



Fuente: Autoras.

En la columna de la izquierda denominada “datos de entradas”, se ingresó la composición Vital S.A. Esto es con el promedio calculado. Los datos que se agregaron se actualizan de manera automática y se ven reflejados en la columna de la derecha “variables compuestas” mostrando los nuevos valores de estas.

Los valores de las variables compuestas reflejan los resultados de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno Total Kjeldahl (TKN) y nitrógeno amoniacal. Tenga en cuenta que el valor de Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) se deben ajustar con los datos obtenidos en la caracterización previa del agua residual cruda.

Del afluente, que se obtuvo de las caracterizaciones del agua residual brindadas por la empresa Red

Es importante calcular los siguientes coeficientes para completar la hoja del consejero del afluente:

$$IVT = \frac{SSV}{SST}$$

$$ICV = \frac{DQO_{total} - DQO_s}{SSV}$$

Puesto que el IVT es la relación entre los Sólidos Suspending Volátiles (SSV) y los Sólidos Suspending Totales (SST).

El ICV es la relación entre Demanda Química de Oxígeno Total (DQO Total) menos Demanda Química de Oxígeno Soluble (DQO<sub>5</sub>) sobre los Sólidos Suspending Volátiles (SSV), estos valores se pueden modificar, para calibrar los parámetros del fraccionamiento orgánico (cuando se resaltan algunas variables de salida en rojo, nos indica una concentración negativa estas pueden causar errores de balance de masa y problemas de convergencia).

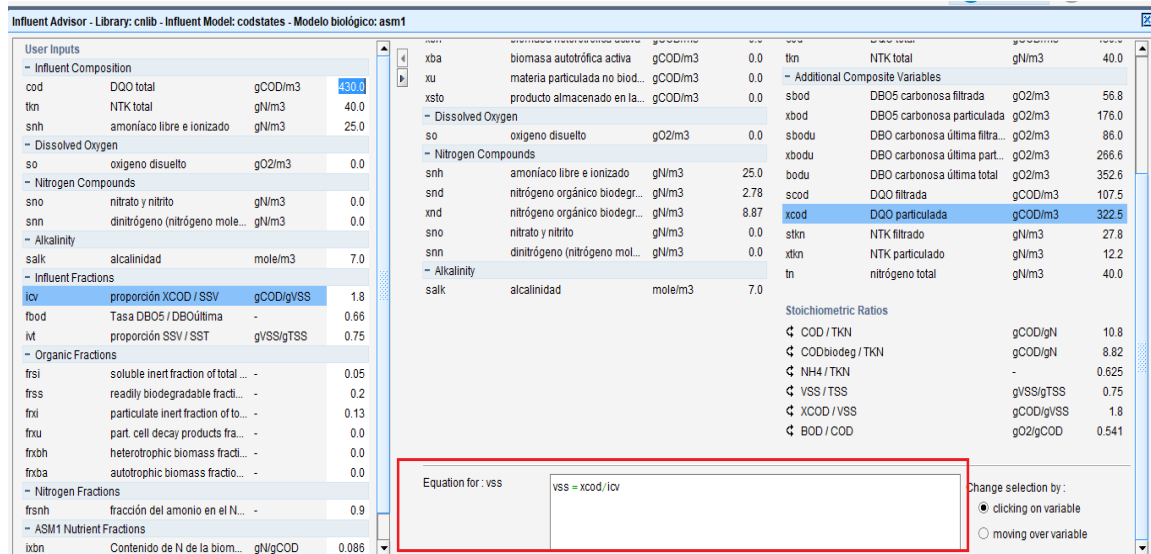
$$fbod = \frac{DBO_5}{DBO_u}$$

Y, por último, la fbod, que relaciona la DBO<sub>5</sub> y la DBO última (DBO<sub>u</sub>).

- Se identificó la variable (SSV) en la columna de la derecha “variables compuestas” y haciendo clic en el valor. Se visualiza una fórmula para calcular los Sólidos Suspending Volátiles (SSV) en la parte inferior de la tabla del consejero del afluente (Ver Figura 42).

Figura 42

Ventana del consejero del afluente

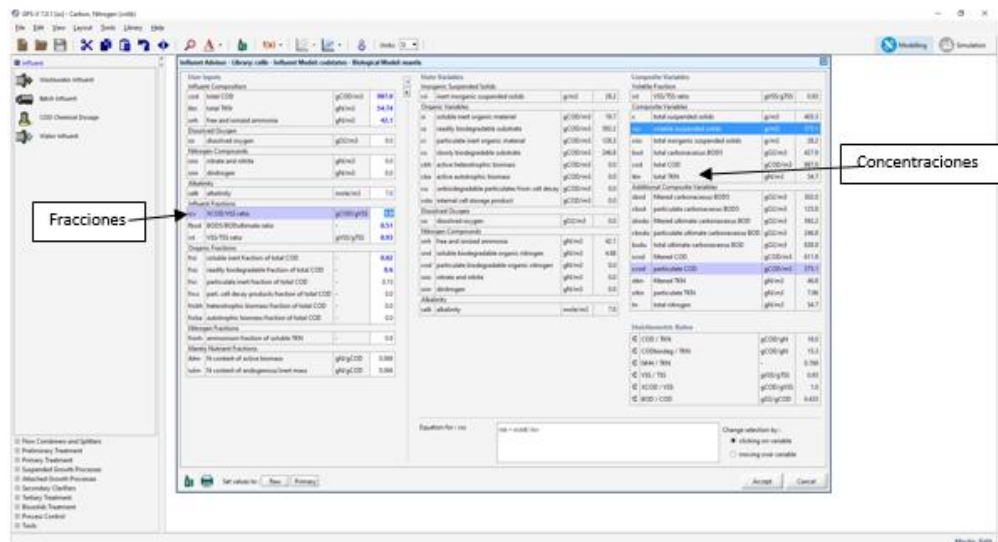


Fuente: Autoras.

- Se ajustaron los parámetros del afluente (fracciones y / o Concentraciones); teniendo en cuenta que cada parámetro tiene una ecuación diferente con la cual se deberá ajustar el modelo con los valores medidos en el laboratorio para el agua residual cruda.

Figura 43

Ajuste de datos en el consejero del afluente



Fuente: Autoras.



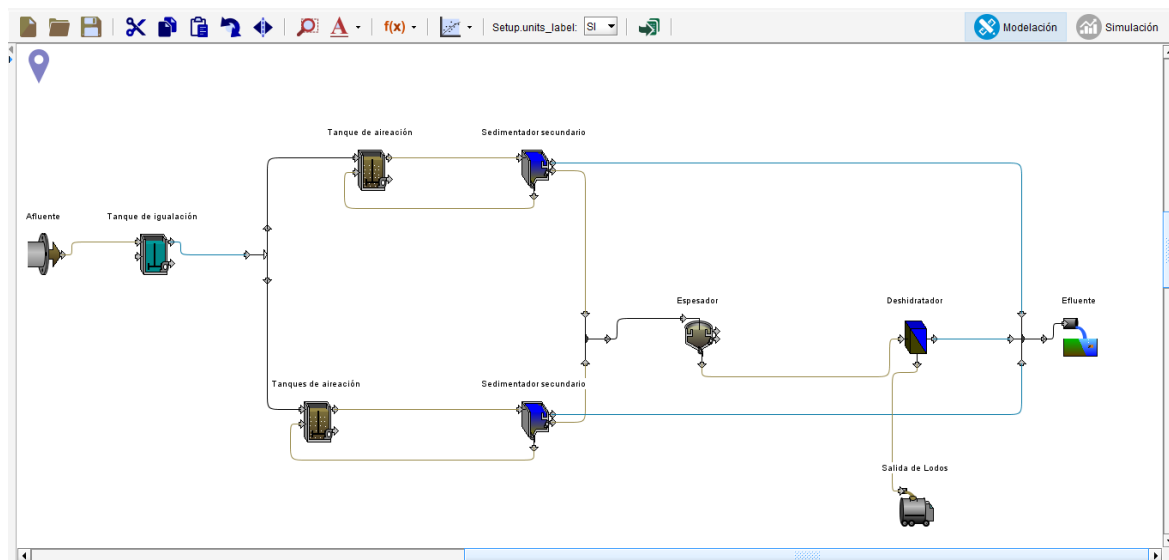
Cuando ya se tiene el fraccionamiento del agua residual cruda con propósitos de modelación se puede proceder a implementar el esquema de la PTAR en GPS-X y correr el modelo del sistema.

## Modelación

El primer escenario que se modeló en el programa GPS-X fue el funcionamiento de la planta en sus condiciones y operación actual, de tal manera que se pueda tener una idea sobre su funcionamiento y la comparación con las mediciones realizadas en el efluente.

### Figura 44

#### *Operación actual de la PTAR*



Fuente: Autoras.

En la Figura 45, se muestra el consejero con los datos promediados del afluente, ya calibrados y con los demás constituyentes según los requeridos por el modelo.

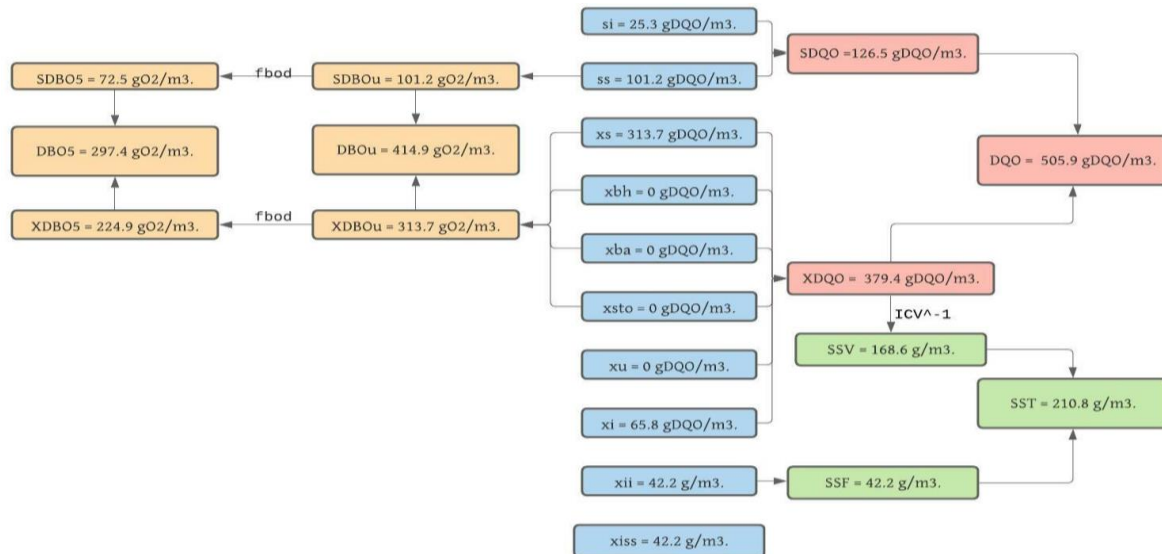
Figura 45

## Consejero del afluente

User Inputs				Variables de Estado				Variables compuestas			
<b>- Influent Composition</b>				<b>- Inorganic Suspended Solids</b>				<b>- Volatile Fraction</b>			
cod	DQO total	gCOD/m3	505.9	xii	sólidos suspendidos inorg...	g/m3	42.2	vt	proporción SSV / SST	gVSS/gTSS	0.8
tkn	NTK total	gN/m3	57.7	<b>- Organic Variables</b>				<b>- Composite Variables</b>			
snh	amoníaco libre e ionizado	gN/m3	40.7	si	material orgánico soluble i...	gCOD/m3	25.3	x	sólidos suspendidos totales	g/m3	210.8
<b>- Dissolved Oxygen</b>				ss	substrato biodegradable di...	gCOD/m3	101.2	vss	sólidos suspendidos voláti...	g/m3	168.6
so	oxígeno disuelto	gO2/m3	0.0	xi	material orgánico inerte par...	gCOD/m3	65.8	xiss	sólidos suspendidos inorg...	g/m3	42.2
<b>- Nitrogen Compounds</b>				xs	substrato lentamente biode...	gCOD/m3	313.7	bod	DBO5 carbonosa total	gO2/m3	297.4
sno	nitrito y nitrito	gN/m3	0.0	xbh	biomasa heterotrófica activa	gCOD/m3	0.0	cod	DQO total	gCOD/m3	505.9
snn	dinitrógeno (nitrogeno mole...	gN/m3	0.0	xba	biomasa autotrófica activa	gCOD/m3	0.0	tkn	NTK total	gN/m3	57.7
<b>- Alkalinity</b>				xu	materia particulada no biod...	gCOD/m3	0.0	<b>- Additional Composite Variables</b>			
salk	alcalinidad	mole/m3	7.0	xsto	producto almacenado en la...	gCOD/m3	0.0	sbod	DBO5 carbonosa filtrada	gO2/m3	72.5
<b>- Influent Fractions</b>				<b>- Dissolved Oxygen</b>				xbod	DBO5 carbonosa particulada	gO2/m3	224.9
icv	proporción XCOD / SSV	gCOD/gVSS	2.25	so	oxígeno disuelto	gO2/m3	0.0	sbodu	DBO carbonosa última filtra...	gO2/m3	101.2
fbod	Tasa DBO5 / DBOúltima	-	0.717	<b>- Nitrogen Compounds</b>				xbodu	DBO carbonosa última part...	gO2/m3	313.7
vt	proporción SSV / SST	gVSS/gTSS	0.8	snh	amoníaco libre e ionizado	gN/m3	40.7	bodu	DBO carbonosa última total	gO2/m3	414.8
<b>- Organic Fractions</b>				snd	nitrogeno orgánico biodegr...	gN/m3	4.52	scod	DOO filtrada	gCOD/m3	126.5
frsi	soluble inert fraction of total ...	-	0.05	xnd	nitrogeno orgánico biodegr...	gN/m3	8.53	xcod	DOO particulada	gCOD/m3	379.4
frss	readily biodegradable fracti...	-	0.2	sno	nitrito y nitrito	gN/m3	0.0	stkn	NTK filtrado	gN/m3	45.2
frxi	particulate inert fraction of to...	-	0.13	snn	dinitrógeno (nitrogeno mol...	gN/m3	0.0	xtkn	NTK particulado	gN/m3	12.5
frxu	part. cell decay products fra...	-	0.0	<b>- Alkalinity</b>				tn	nitrogeno total	gN/m3	57.7
frxbh	heterotrophic biomass fracti...	-	0.0	salk	alcalinidad	mole/m3	7.0	<b>Stoichiometric Ratios</b>			
frxba	autotrophic biomass fractio...	-	0.0	<b>- ASM1 Nutrient Fractions</b>				☞ COD / TKN	gCOD/gN	8.77	
<b>- Nitrogen Fractions</b>				frsnh	fracción del amonio en el N...	-	0.9	☞ CODbiodeg / TKN	gCOD/gN	7.19	
<b>- ASM1 Nutrient Fractions</b>				ixbn	Contenido de N de la biom...	gN/gCOD	0.086	☞ NH4 / TKN	-	0.705	
								☞ VSS / TSS	gVSS/gTSS	0.8	

Fuente: Autoras.

Con el fin de corroborar que el consejero del afluente está correctamente implementado se presenta la relación de las variables de estado del modelo con las variables compuestas (corresponden a las variables medidas comúnmente en el laboratorio) empleando la librería Carbono-Nitrógeno de GPS-X. Esto se presenta en la Figura 46 para DQO, DBO<sub>5</sub> y SST.

**Figura 46***Librería del consejero del afluente*

Fuente: Autoras.

Para los cálculos de la librería se utilizaron las siguientes ecuaciones:

- DQO Soluble (SCOD):

$$SCOD (DQO\text{Soluble}) = Si + Ss$$

Dónde:

$Si$  → es material orgánico soluble inerte.

$Ss$  → es sustrato biodegradable disponible.

- DQO Particulada (XCOD):

$$XCOD (DQO\text{particulada}) = Xs + Xbh + Xba + Xsto + Xu + Xi$$

Dónde:

$Xs$  → es el sustrato lentamente biodegradable.

$Xbh$  → biomasa heterotrófica activa.

$Xba$  → masa autotrófica activa.

$Xsto$  → producto almacenado en las células.

$Xu$  → es materia particulada no biodegradable de descomposición celular.

$Xi$  → es material orgánico inerte particulado.

- DQO (COD):

$$COD (DQO) = SDQO + XDQO$$

Dónde:

SDQO → es la DQO soluble.

XDQO → es la DQO particulada.

- Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV):

$$SSV = \frac{XCOD}{Icv}$$

Dónde:

XCOD → es la DQO particulada.

Icv → es la relación mencionada anteriormente.

- Sólidos Suspendidos Totales (SST):

$$SST = SSV + SSf$$

Dónde:

SSV → son Sólidos Suspendidos Totales.

SSf (xiss) → los cuales son el material inerte.

- DBO<sub>5</sub> Soluble (SBOD<sub>5</sub> o SDBO<sub>5</sub>)

$$SDBO_5 (SBOD_5) = SBOD_u * fbod$$

Dónde:

SBOD<sub>u</sub> → es la DBO<sub>5</sub> última.

fbod → es el coeficiente de la DBO<sub>5</sub>.

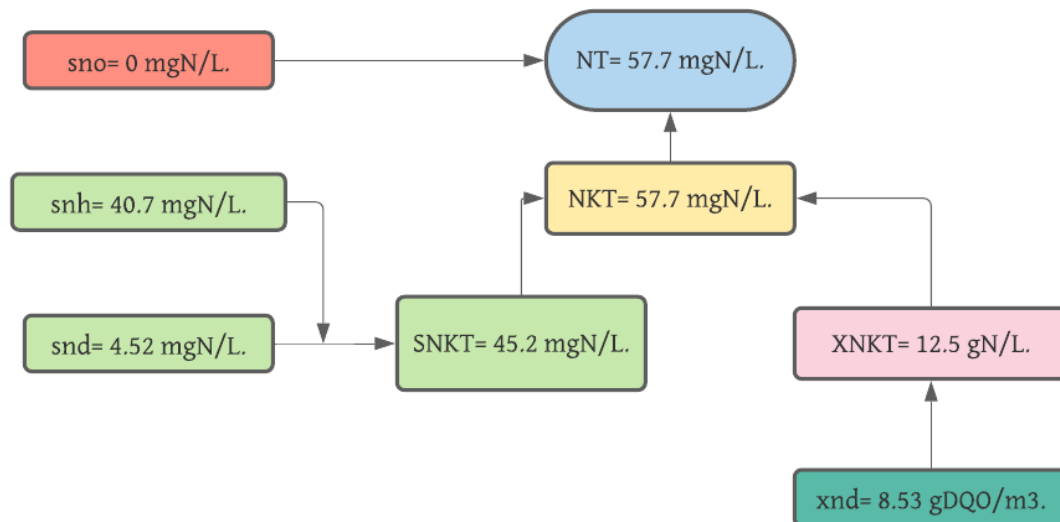
- DBO<sub>5</sub> Particulada (XDBO<sub>u</sub> o XBOD<sub>5</sub>):

$$XBOD_5 (XDBO_5) = XBOD_u * fbod$$

Dónde:

XBOD<sub>u</sub> → es la DBO<sub>5</sub> particulada última.

fbod → es el coeficiente.

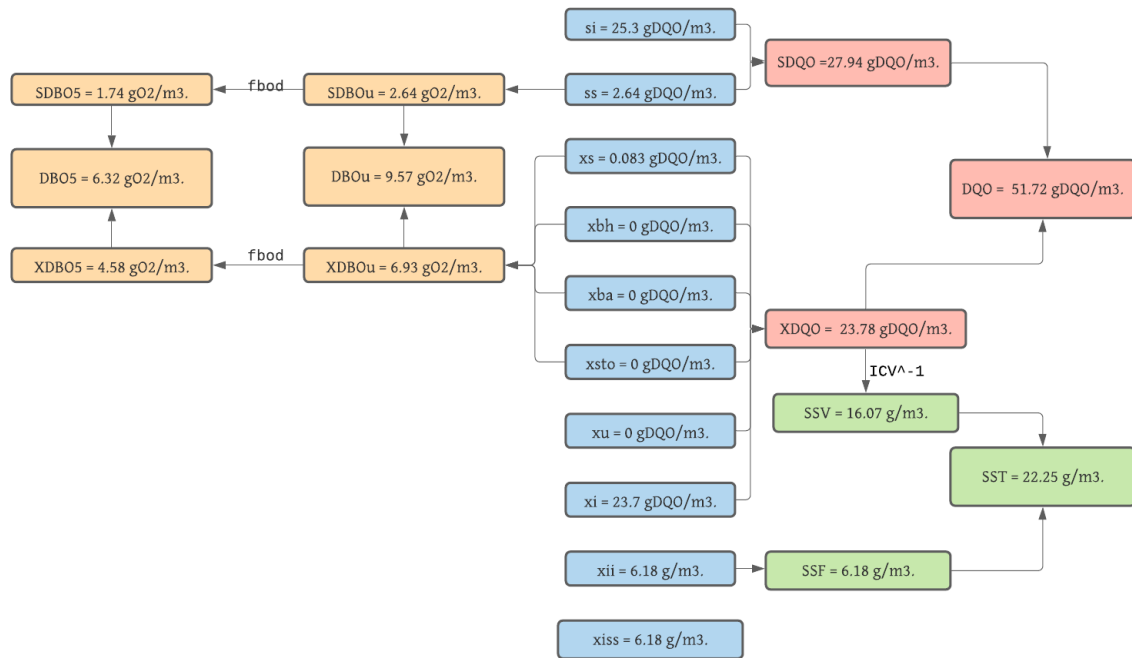
**Figura 47***Librería Nitrógeno del afluente*

Fuente: Autoras.

Por otra parte, una vez realizada la modelación en GPS-X, se generó una librería con las concentraciones de las variables compuestas y las variables de estado del modelo para compararlas con la información medida en las caracterizaciones en el efluente de la PTAR realizadas por Red Vital.

**Figura 48**

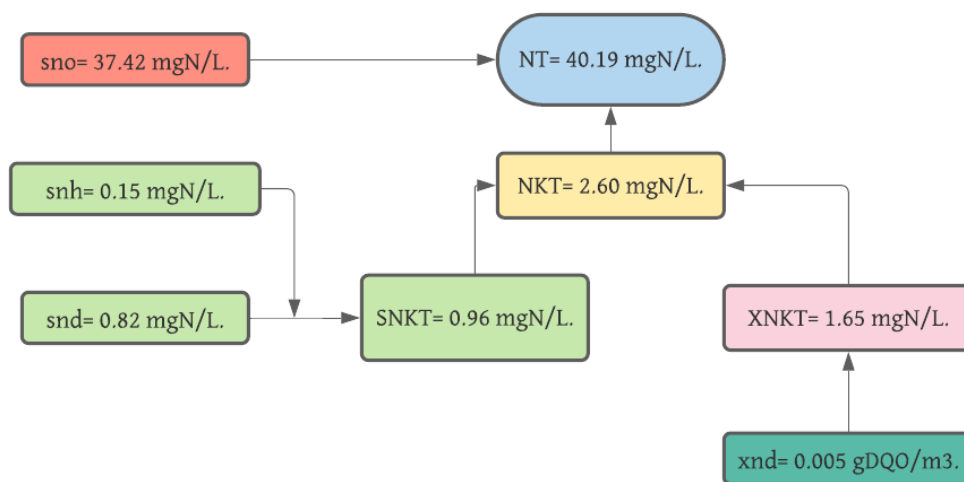
*Librería Carbono del efluente*



Fuente: Autoras.

**Figura 49**

*Librería Nitrógeno del efluente*



Fuente: Autoras.

Otros parámetros que se consideraron para realizar la modelación fueron: La edad del lodo, altitud de la planta y temperatura.

Adicionalmente, se adoptó según Metcalf y Eddy (2014), una edad de lodo y tiempo de retención hidráulico de 25 días y 25 h respectivamente. La edad del lodo se introdujo en el esquema implementado en GPS-X, así: seleccionando como “la masa de microorganismos en el sistema” los dos tanques de aireación y, por otro lado, la “carga de microorganismos saliendo del sistema” se definió para la línea que lodo de exceso que sale del sedimentador secundario y la línea del efluente.

También, es importante mencionar que se debe hacer una verificación de lo realizado anteriormente, para el caso del tiempo hidráulico de retención se hace la verificación con la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{V}{Q}$$

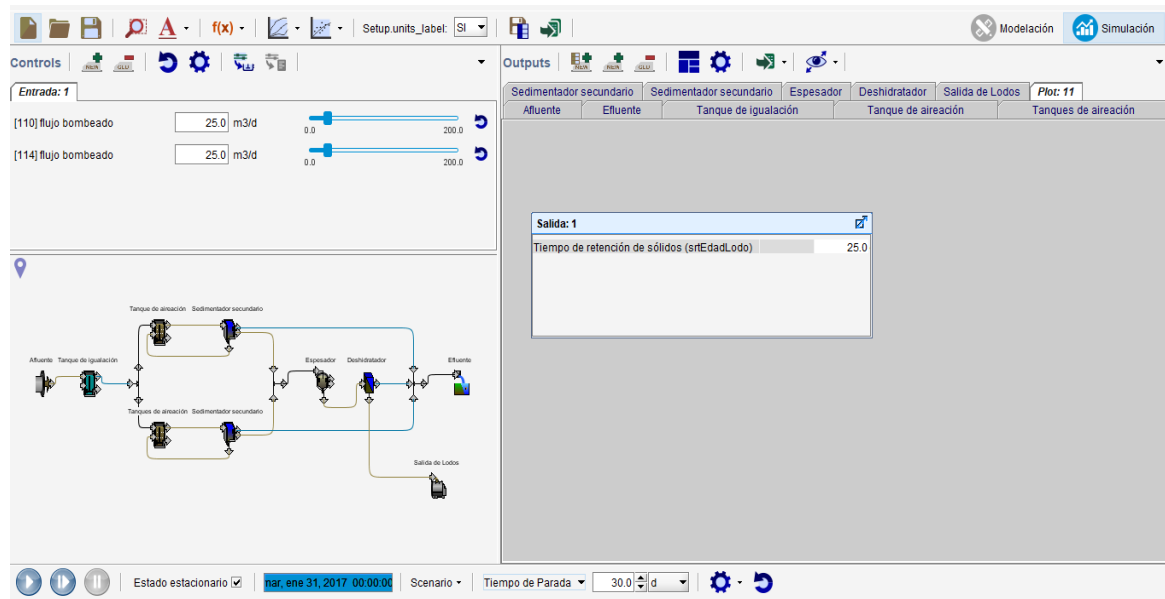
Dónde:

V → es el volumen de los reactores.

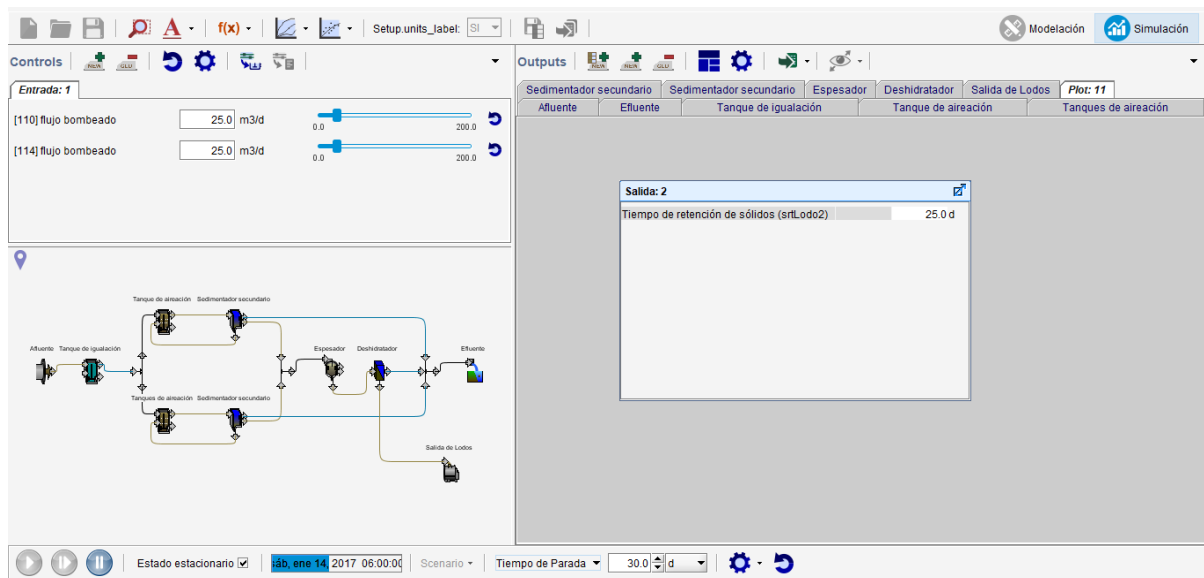
Q → es el caudal que corresponde a los 15 L/s, es decir por cada tanque.

$$\tau = \frac{1106 \text{ m}^3}{54 \text{ m}^3/\text{h}} \rightarrow \tau = 20.48 \text{ h.}$$

Adicionalmente, se verificó la edad del lodo en GPS-X con los datos del caudal de exceso. Se encontró que con 25 m<sup>3</sup>/d de lodo de exceso se tiene una edad del lodo de 25 días (Ver Figura 50 y 51).

**Figura 50***Verificación edad del lodo en GPS-X para el reactor 1*

Fuente: Autoras.

**Figura 51***Verificación edad del lodo en GPS-X para el reactor 2*

Fuente: Autoras.

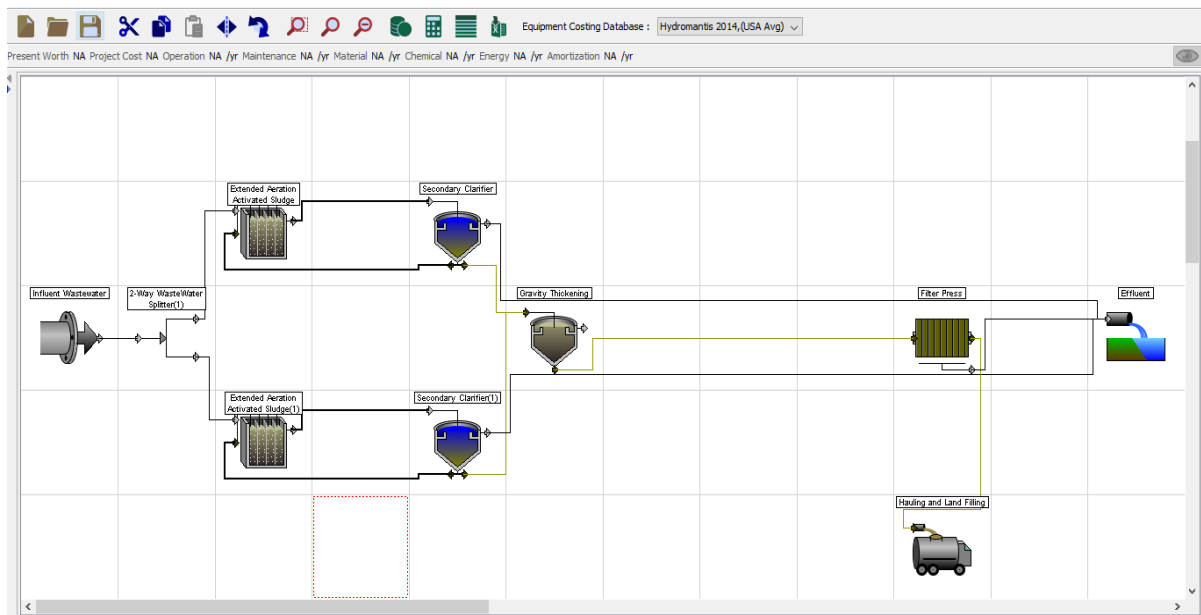


## Chequeo del volumen requerido de los tanques de aireación

Además de ello, por medio del software Capdetworks se realizó el chequeo del volumen de los reactores (Ver Figura 52), comprobando de esta forma que el volumen actual de los tanques es no funcional.

**Figura 52**

*Esquema en Capdetworks*



Fuente: Autoras.

Luego de implementar el esquema en Capdetworks se evaluó el diseño, se procedió a generar un reporte (Anexo C), en el cual se pueden observar los costos y el volumen requerido por el sistema. En el caso actual de la planta, cada tanque de aireación tiene un volumen en los reactores de  $1106 \text{ m}^3$  y el programa arroja que se debería tener un volumen de  $1250 \text{ m}^3$  para cada tanque (Ver Figura 53). Por lo tanto, se puede concluir que la PTAR no tiene un volumen adecuado.

Figura 53

## Verificación del volumen de los reactores en Capdetworks

Summary of All Layouts

Layout Name	Present Worth	Project	Operational	Maintenance	Material	Chemical	Energy	Amortization
Actual	COL6,080	COL3,520	COL117	COL24	COL29	COL0	COL15	COL321
Futuro	COL6,140	COL3,590	COL118	COL24	COL29	COL0	COL15	COL324

Details

Actual | Futuro

Actual

Description	Construction	Operational	Maintenance	Material	Chemical	Energy	Amortization
2-Way Wastewater Splitter(1)	COL0	COL0	COL0	COL0	COL0	COL0	COL0
Extended Aeration Activated Sludge	COL148	COL18	COL6	COL6	COL0	COL7	COL14
Extended Aeration Activated Sludge(1)	COL148	COL18	COL8	COL6	COL0	COL7	COL14
Secondary Clarifier	COL105	COL8	COL4	COL1	COL0	COL0	COL10

Extended Aeration Activated Sludge

Show :  Design Information  Quantities Required  Estimated Costs

Extended Aeration Activated Sludge | Sludge Recycle Pumping

Description	Value	Units	Notes
Design SRT for design at winter temperature	25.0	d	
Design SS	4310	g/m3	
Calculated VSS	3210	g/m3	
Calculated VSS:TSS ratio	0.745	mg VSS/mg SS	
Total volume of reactors	1250	m3	
Length of parallel train	15.0	m	

Wastewater Quality

Parameter	Influent	Effluent	Units
Maximum flow	1300	1300	m3/d
Minimum flow	1300	1300	m3/d
Average flow	1300	1300	m3/d
Suspended solids	211	4310	g/m3
% volatile solids	80.0	74.5	%

Fuente: Autoras.

### Calidad del agua

La información colectada de las caracterizaciones se comparó con los resultados del modelo y con los requerimientos establecidos en la Resolución 631 de 2015. La comparación entre las mediciones y el modelo es una comparación básica pues con la escasa información de mediciones es imposible realizar una evaluación más detallada. Un ejercicio de calibración del modelo se puede intentar con más información y en un proyecto futuro.

Para poder comprar con la resolución se debió hallar la carga entrando a la planta utilizando los datos de caudal y DBO<sub>5</sub>, como se muestra a continuación:

Caudal=29.3 L/s y DBO<sub>5</sub>=297.5 mgO<sub>2</sub>/L, a dichos valores se les debe realizar una conversión de unidades.

$$\text{Caudal} = \frac{29.3 \text{ L}}{\text{s}} * \frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ d}} = \frac{2531232 \text{ L}}{\text{d}}$$

$$\text{DBO}_5 = \frac{297.5 \text{ mgO}_2}{\text{L}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000000 \text{ mg}} = \frac{0.0002975 \text{ kgO}_2}{\text{L}}$$

Para hallar la carga se multiplicaron los valores obtenidos anteriormente, así:

$$\text{Carga} = \frac{2531232 \text{ L}}{\text{d}} * \frac{0.0002975 \text{ kgO}_2}{\text{L}} = 753.04 \frac{\text{kg O}_2}{\text{d}}$$

### ***Datos medidos***

En cuanto a los datos medidos en el efluente y su comparación con la normatividad vigente se realizó para DQO, SST, Sólidos sedimentables y pH. Todos los parámetros están dentro de los límites máximos permisibles para los vertimientos puntuales de aguas domésticas, cumpliendo así con la normatividad vigente. Esto indica que, aunque la planta tiene deficiencias en su operación sigue cumpliendo con los requerimientos de la legislación vigente (Ver Tabla 9).

**Tabla 9**

*Comparación datos del efluente con resolución 631 de 2015*

<b>Parámetro</b>	<b>Res. 631 de 2015</b>	<b>Valor</b>
DQO total (mgO <sub>2</sub> /L)	200.0	61.67
pH	6.0-9.0	7.30
SST (mgSST/L)	100.0	22.61
Sólidos Sedimentables (SS) (mLSS/L)	5.0	1.22

Fuente: Autoras.

Después de realizar el montaje del modelo de la planta con su funcionamiento actual se procedió a ejecutarlo y se obtuvieron los datos del efluente arrojados por el programa y con ello, generar un reporte con el fin de realizar la comparación de los datos brindados por la empresa Red Vital Paipa (Ver Tabla 10).

**Tabla 10***Comparación datos reales vs datos modelados*

<b>Parámetro</b>	<b>Res. 631 de 2015</b>	<b>Valores reales</b>	<b>Valores modelo</b>	<b>Desviación estándar</b>
DQO total (mgO <sub>2</sub> /L)	200	61.67	51.72	7.03
pH	6.0-9.0	7.3	7.2	0.007
SST (mgSST/L)	100	22.61	22.25	0.25
Solidos Sedimentables (SS) (mLSS/L)	5	1.22	----	----

Fuente: Autoras.

Al realizar la comparación de los valores obtenidos en el modelo con los valores de los laboratorios, se puede observar en la tabla 9, que el parámetro que representa mayor dispersión con respecto a la media es la DQO, en cuanto a pH y Sólidos Suspendidos Totales (SST) no presentan mayor variación entre los datos medidos y modelados, lo que indica que el montaje del modelo se realizó de forma adecuada.

## Escenarios de optimización y operación para el sistema de tratamiento

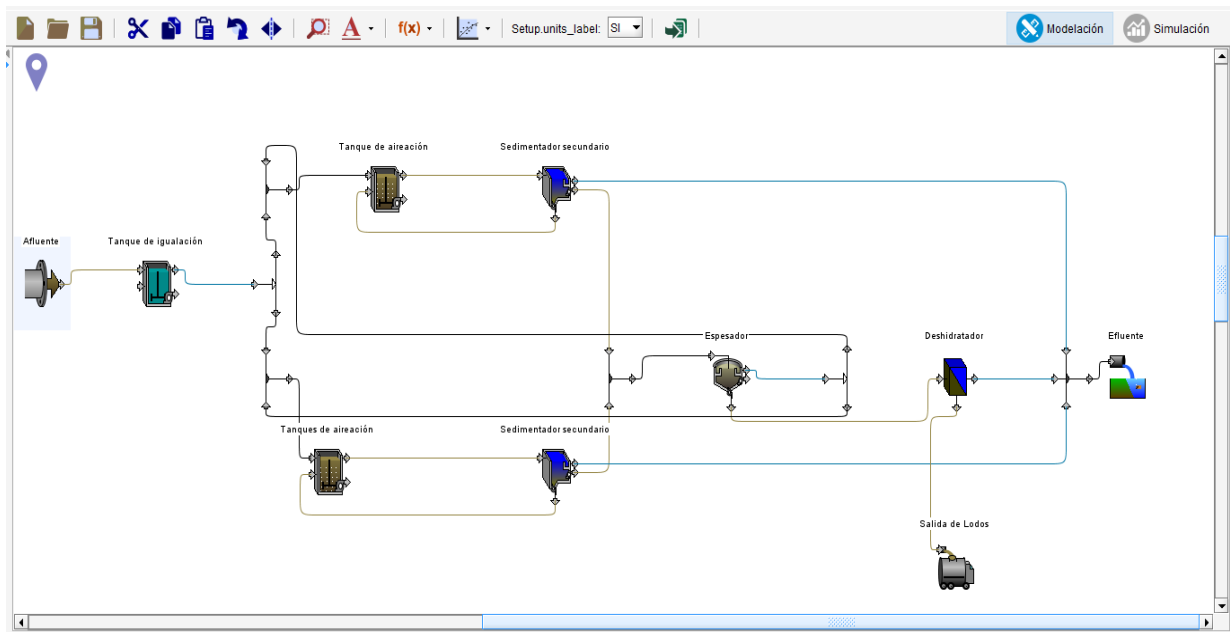
En el siguiente capítulo se presentarán las dos alternativas de mejora, los modelos de optimización propuestos, el nuevo volumen de los reactores biológicos con su verificación, evaluando la calidad de agua a futuro y con sus respectivas recomendaciones de cambios en los equipos.

### Primer escenario de optimización

El primer escenario de optimización modelado en GPS-X (Ver Figura 54) fue sistema actual de la planta más el caudal de aguas que se deben recircular del espesador de lodos hacia los tanques. La PTAR actualmente no cuenta con esta línea de recirculación y por lo tanto se evaluó la influencia de implementar este flujo.

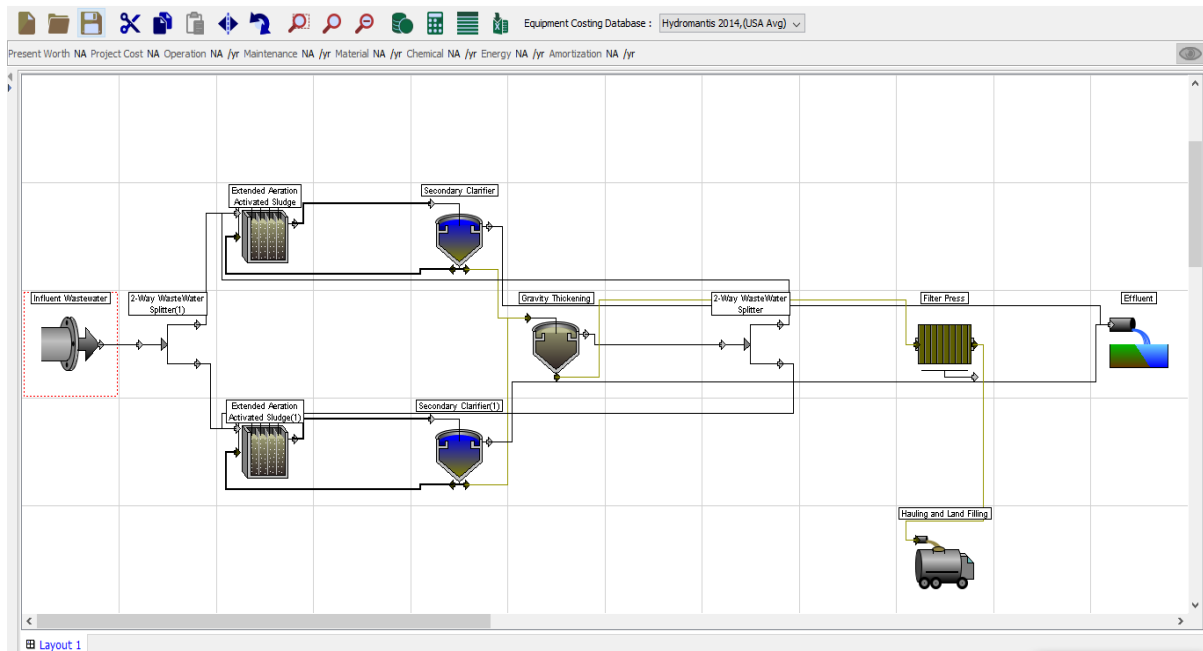
**Figura 54**

*Escenario Futuro*



Fuente: Autoras.

Para determinar el volumen de los tanques de aireación con el caudal recirculando del espesador de lodos, se realizó el mismo esquema anterior en Capdetworks (Ver Figura 55).

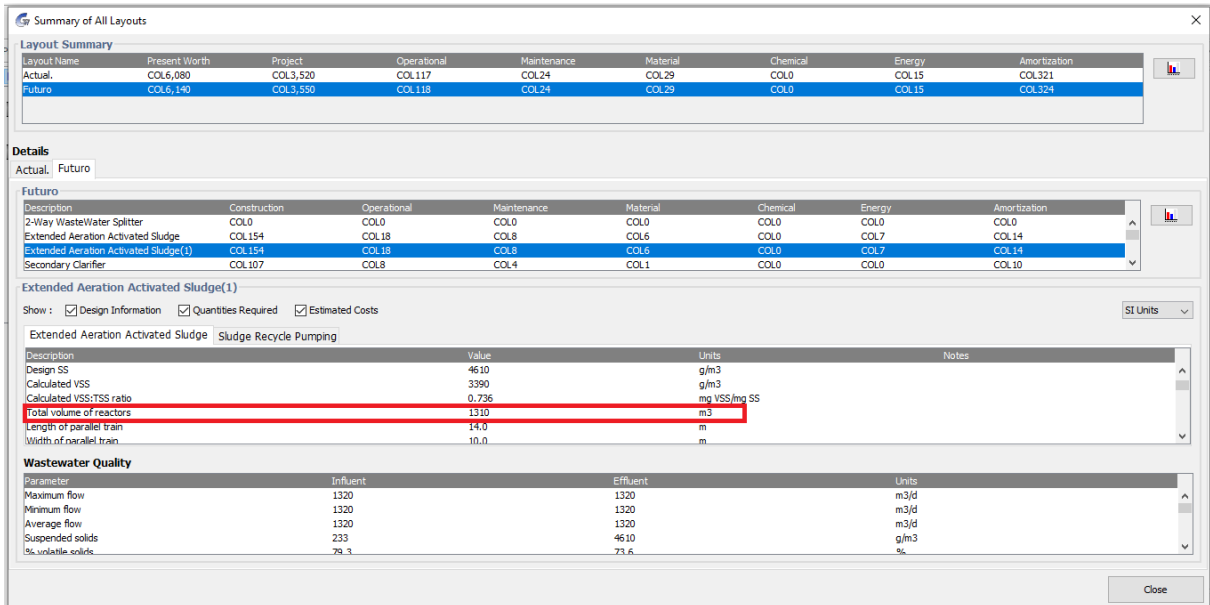
**Figura 55***Comprobación escenario futuro*

Fuente: Autoras.

Luego de realizar la evaluación en Capdetworks, se procedió a generar un reporte (Anexo D) en el cual se puede observar a detalle la implementación del escenario, y el volumen requerido por el sistema para ser funcional con el caudal de recirculación. En el caso actual de la planta se cuenta con un volumen en cada reactor de  $1106\text{m}^3$  y el programa arroja que se debería tener un volumen de  $1310\text{ m}^3$  para cada uno de ellos (Ver Figura 56), y así poder tratar el caudal de recirculación del espesador. Por lo tanto, se puede concluir que los reactores actuales no tienen el volumen requerido para tratar los  $30\text{ L/s}$  más el agua recirculada, de tal manera se requiere una ampliación de los mismos.

**Figura 56**

*Comprobación del volumen de los reactores en el escenario futuro*

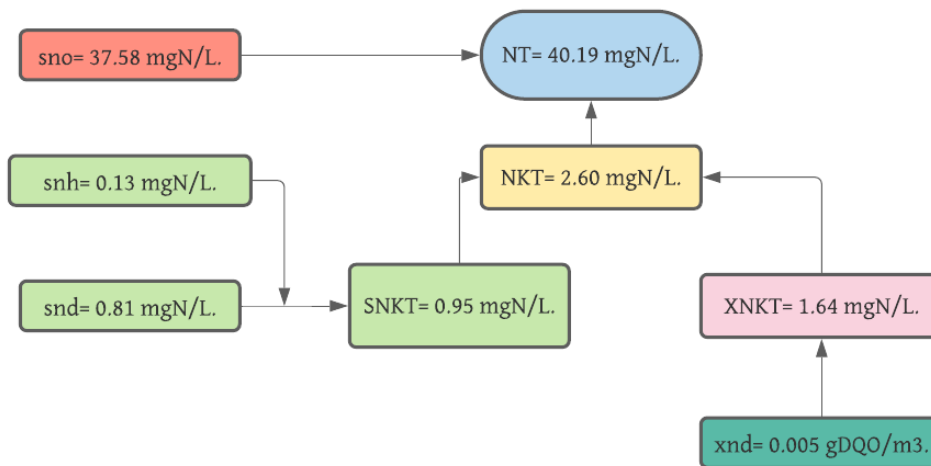


Fuente: Autoras.

Se realizó la libería de Nitrógeno en el efluente con el fin de ver los valores parámetros al final del tratamiento.

**Figura 57**

*Librería Nitrógeno escenario futuro del efluente*



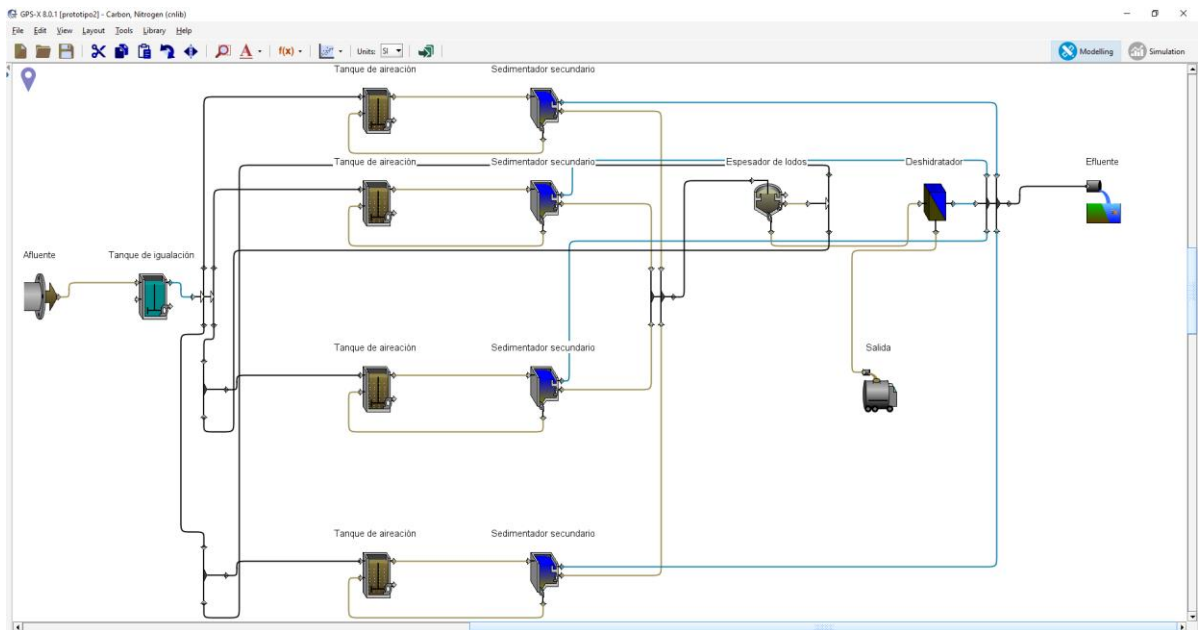
Fuente: Autoras.

## Segundo escenario de optimización

El segundo escenario modelado, fue el mismo realizado anteriormente más el caudal de exceso que está llegando a la planta, debido a que la PTAR desde su construcción está trabajando con un caudal de 30 L/s, pero como se mencionó anteriormente desde la EBAR se está recibiendo un caudal mayor (aproximadamente de 60 L/s según comentó el operario de la planta Cesar Mateus) y por ello, se está descargando la mitad de agua sin tratar al río Chicamocha. Por lo anterior, se modeló la planta con dos tanques de aireación (1310 m<sup>3</sup>) y dos sedimentadores más para de esta forma tratar dicho caudal de exceso y lograr una optimización en la planta y sus procesos.

### Figura 58

*Escenario futuro modelado con el caudal de exceso*



Fuente: Autoras.

Por otra parte, una vez realizada la modelación en GPS-X, se generó la librería de carbono y nitrógeno con las concentraciones medidas en el efluente (Ver Figura 59).

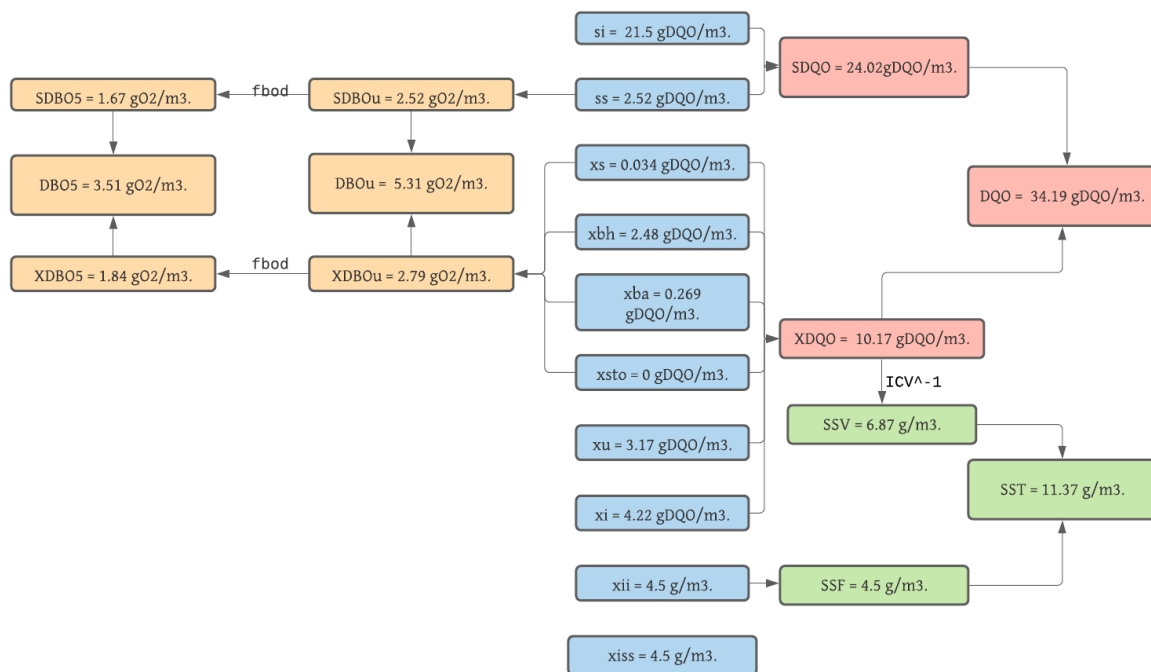
En cuanto a los costos para la construcción de los reactores con volumen de 1310 m<sup>3</sup>, se tendrá un valor actual de noventa y tres mil cuatrocientos millones de pesos colombianos (93.400'000.000 COP), para su correcta operación la empresa tendrá que contar con mil



ochocientos millones de pesos colombianos por año (1.800'000.000 COP), igualmente se tendrán que hacer mantenimientos los cuales se estima que serán de trescientos setenta y tres millones de pesos colombianos al año (373'000.000 COP) y sin dejar de lado que se tendrá que costear la energía, la cual se valora en doscientos treinta y tres millones de pesos colombianos por año (233'000.000 COP). En definitiva, es un proyecto que necesita de gran presupuesto, pero a la vez se tendrá una amortización por año de cuatro mil novecientos veinte millones de pesos colombianos (4.920'000.000 COP).

**Figura 59**

*Librería carbono para el efluente para el segundo escenario de optimización*

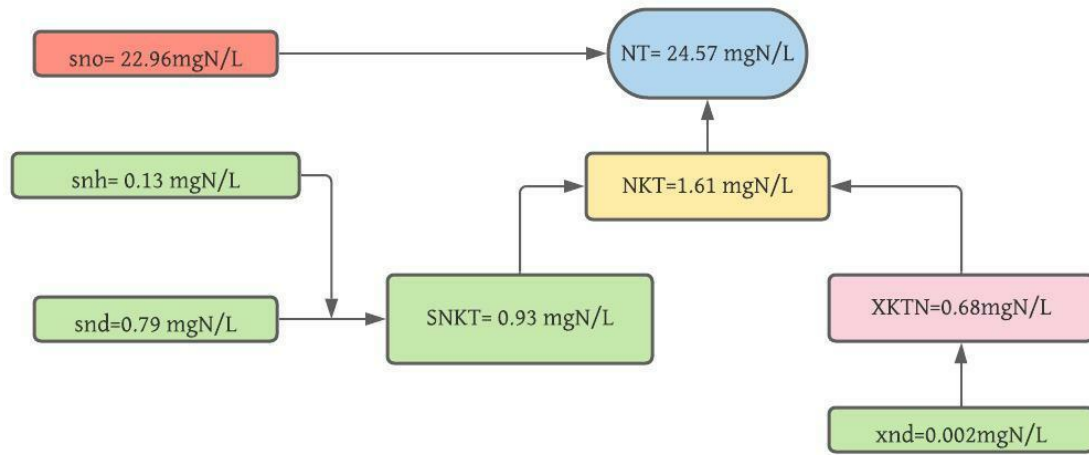


Fuente: Autoras.

Como se puede observar en la Figura 59 los valores de los parámetros son bajos, lo cual indica que se está llevando a cabo un adecuado tratamiento del agua.

**Figura 60**

*Librería nitrógeno para el efluente para el segundo escenario de optimización*



Fuente: Autoras.

Es claro que con los nuevos volúmenes de reactores tratando el caudal total de la planta se cumple con los requerimientos de la legislación colombiana definidos en la Resolución 631 de 2015.

### **Cálculo del sistema de aireación con Aqua Aero**

El software Aqua Aero se empleó para sugerir cambios en el sistema de aireación actual y futuro, ya que en la visita realizada a la planta se observó que hay problemas en el mismo tales como; zonas muertas y espuma color café oscuro en los reactores biológicos los cuales indican problemas con la población de bacterias y la cantidad de aire suministrado. Por lo tanto, se presentan los sopladores con su potencia y marca, así como la disposición de difusores y marca.

#### ***Escenario actual***

Se emplearon para el cálculo los datos actuales de la planta, como: la altura de la ubicación de la planta, el volumen (1106 m<sup>3</sup>), algunos parámetros químicos y biológicos, las dimensiones del tanque, número de tanques (dos) y el tipo de proceso que se lleva a cabo en

este que corresponde a remoción de carbono y nitrificación. Para luego poder seleccionar los sopladores.

**Figura 61**

*Selección de sopladores en Aqua Aero*

The screenshot displays the AQUA AERO 3.0 software interface. On the left, a flowchart shows the process flow: AQUA AERO -> Basic Data Start Values -> Oxygen Demand -> Membrane Aeration and Surface Aeration -> Mixer -> Aerator and Aeration -> Pipeline -> Oxygen Efficiency -> Invest Costs -> Operation Costs -> Project Life Cycle Costs. The main configuration area on the right includes:

- Project Name: Paipa\_Calculo\_Tanque\_
- Project Subhead: Erika Figueredo e Ingrid Díaz
- Chamber selection:
  - Round Tank
  - Circular Tank
  - Rectangular Tank
  - Plug Flow Reactor
  - Other Forms of the Tank
- Geometry of Tank - Rectangular Tank:
  - Water Depth: 4.0 m
  - Length (L): 20.0 m
  - Width (B): 13.8 m
  - Number of Tanks: 2
- Volume of Tank:
  - Volume, per Tank: 1,104.00 m<sup>3</sup>
  - Total Volume: 2,208.00 m<sup>3</sup>
- Cleaning Process:
  - Nitrification
  - Separate Stage Denitrification
  - Intermittent Denitrification
  - Simultaneous Denitrification
  - Combined Denitrification
  - Phosphorus Removal
    - FeCl<sub>3</sub>
    - AlCl<sub>3</sub>

An 'Apply' button is located at the bottom right of the configuration area.

Fuente: Autoras.

Lo anterior con el fin de proponer un cambio de los sopladores utilizados actualmente por sopladores de lóbulos rotativos de la empresa Kaeser, de perfil Omega 43 Plus – DB 236C y se considera su nominal de 22.00 kW y su potencia de soplo de 17.97 kW (Ver Figura 62). Se implementaría un soplador por tanque y se mantiene uno de reserva. Sus ventajas son: ahorra espacio, ya que son modulares y compactos, por lo que no tendría problema con la sala de máquina que hay actualmente y tienen alta eficiencia; hay tratamiento de aguas seguro y de bajo consumo, porque no hay pérdidas de presión y no hay obstrucción de materiales de filtración; también maneja bajos niveles de ruido, lo cual es un cambio positivo para los operarios de planta.

**Figura 62**

*Soplador de lóbulos rotativos de Kaeser de perfil Omega 43 Plus – DB 236C*

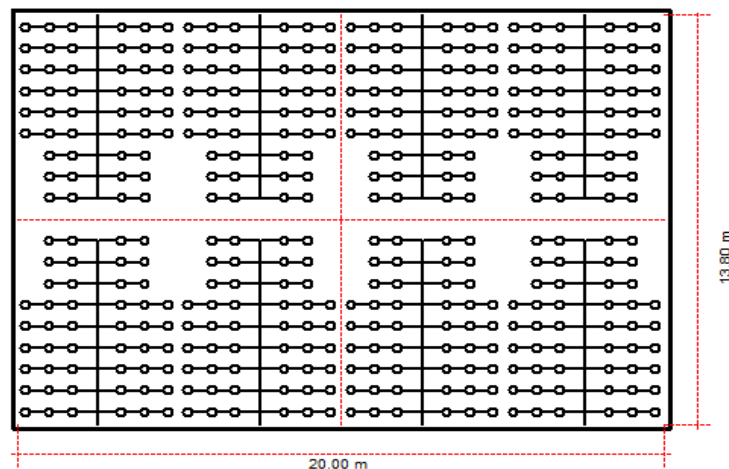


Fuente: KAESER. (2022a). *Compresores y Sopladores de Lóbulos rotativos resistentes* – Kaeser Compresores. <https://co.kaeser.com/productos-y-soluciones/sopladores/sopladores-de-lobulos-rotativos/>

Además, se quiere cambiar los difusores que se encuentran dentro de los reactores biológicos para dar una mayor eficiencia. Se modificarían por tanque Difusores Roeflex de la empresa Passavant - Intech (Ver Figura 64), donde se necesitan 336 difusores por tanque, o sea 672 por los dos tanques de aireación y su configuración se obtuvo en el mismo software Aqua Aero (Ver Figura 63).

**Figura 63**

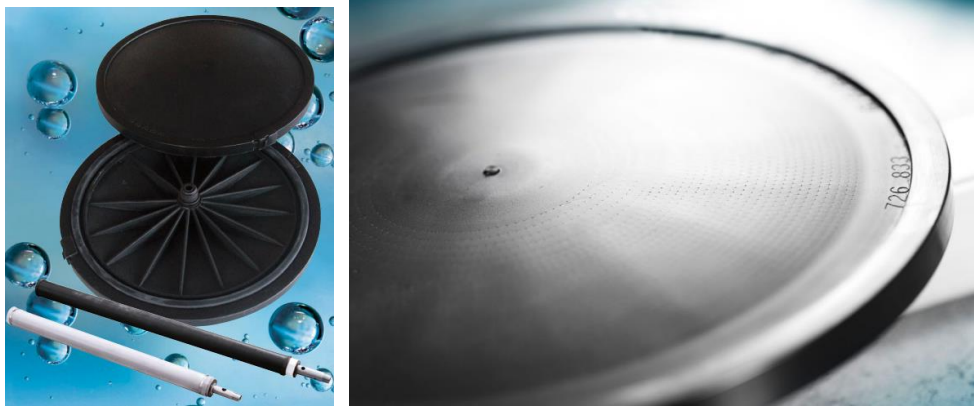
*Soplador de lóbulos rotativos de Kaeser de perfil Omega 43 Plus – DB 236C*



Fuente: Autoras.

**Figura 64**

*Difusores Roeflex de la empresa Passavant – Intech*

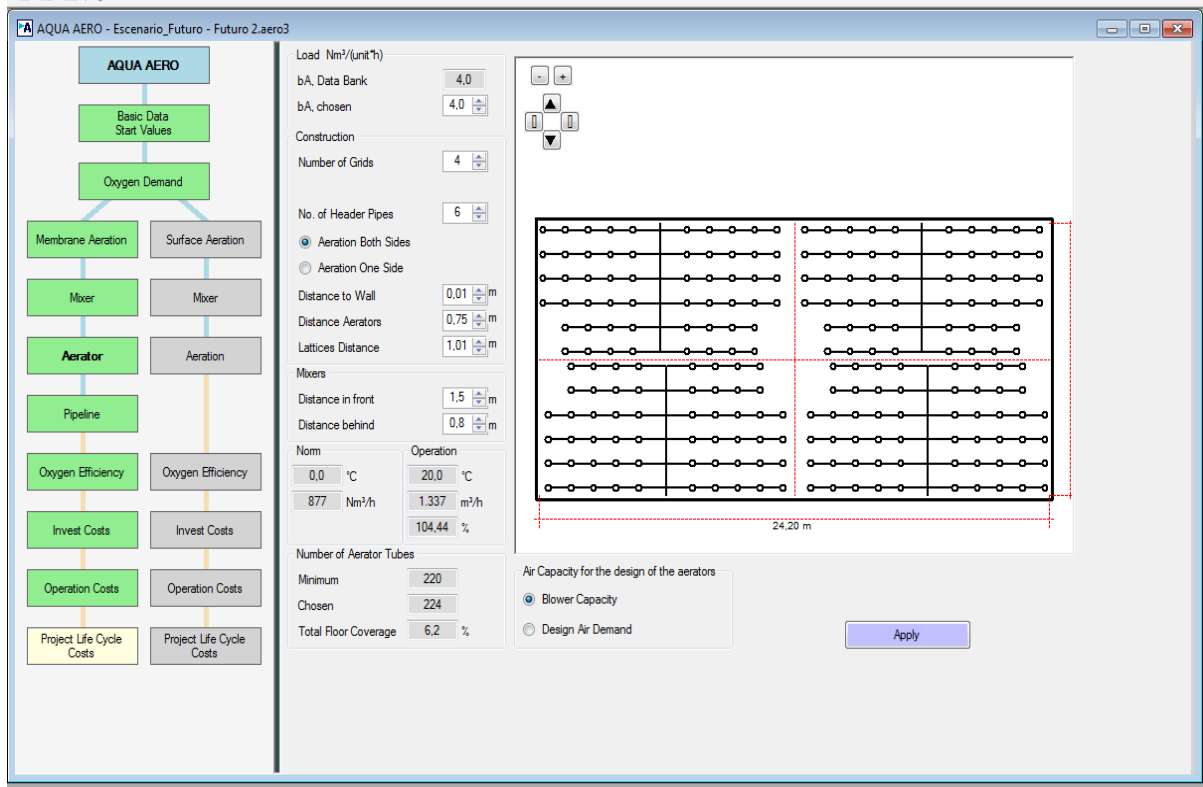


Fuente: Passavant. (2022, 9 de febrero). *Passavant® Fine Bubble aeration ROEFLEX ® BIOFLEX ®*. [https://www.passavant-geiger.com/fileadmin/Resources/Passavant\\_Geiger\\_Noggerath/Products/Documents/Passavant\\_Fine\\_Bubble\\_Aeration\\_Roeflex\\_Bioflex/AS\\_Passavant\\_Fine\\_Bubble\\_Roeflex\\_Bioflex\\_EN\\_WEB.pdf](https://www.passavant-geiger.com/fileadmin/Resources/Passavant_Geiger_Noggerath/Products/Documents/Passavant_Fine_Bubble_Aeration_Roeflex_Bioflex/AS_Passavant_Fine_Bubble_Roeflex_Bioflex_EN_WEB.pdf)

Una desventaja podría ser el costo ya que la inversión requerida para el cambio de los soplores y difusores sería de ciento cincuenta y seis millones quinientos ochenta y dos millones doscientos sesenta mil doscientos ochenta y siete con ochenta y ocho de pesos colombianos (582,260.287.00 COP) al año, incluyendo los costos de mantenimiento, mano de obra, materiales y energía requeridos.

***Escenario futuro***

En este caso se ingresaron las dimensiones de los tanques en el software Aqua Aero de tal forma que se obtuviera el volumen de 1310 m<sup>3</sup> para cada reactor, además de ello se utilizaron datos como: la altura de la ubicación de la planta, algunos parámetros químicos y biológicos, número de tanques (dos) y el tipo de proceso que se lleva a cabo en este que corresponde a remoción de carbono y nitrificación.

**Figura 65***Selección de sopladores en Aqua Aero*

Fuente: Autoras.

Realizado lo anterior, se plantea la utilización de dos sopladores de la empresa Kaeser Omega 52 Plus (Ver Figura 66) con una potencia nominal de 30 kW y una potencia de soplado de 25.38 kW. Las ventajas se consideran las mismas descritas anteriormente, porque son la misma serie de equipos.

**Figura 66**

*Soplador Omega 52 Plus de Keaser*

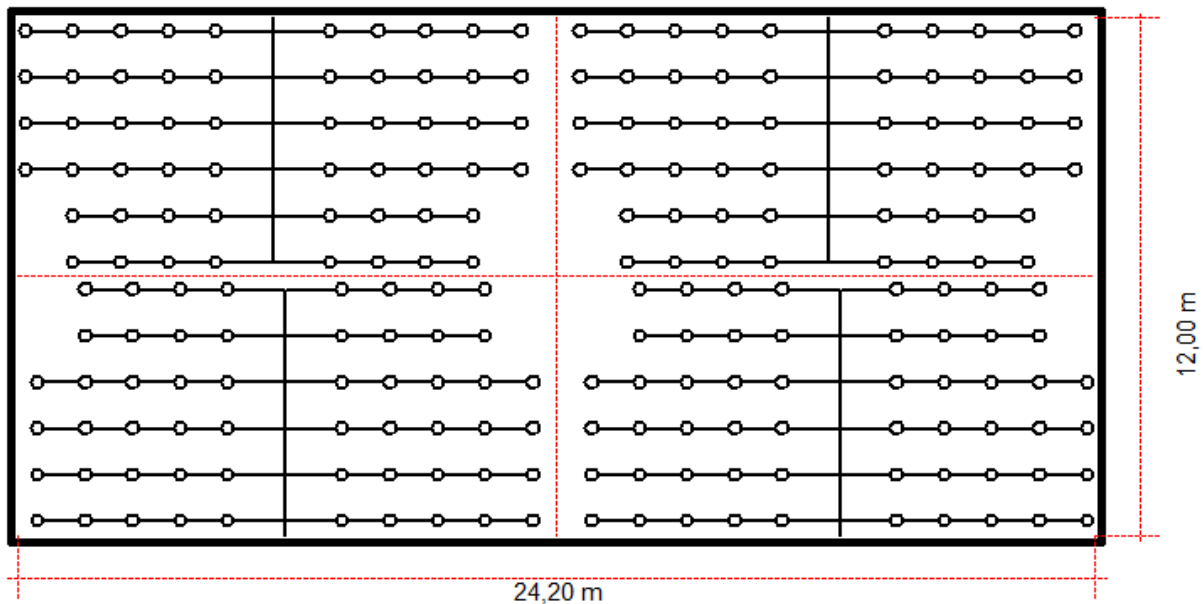


Fuente: KAESER. (2022a). *Compresores y Sopladores de Lóbulos rotativos resistentes* – Kaeser Compresores. <https://co.kaeser.com/productos-y-soluciones/sopladores/sopladores-de-lobulos-rotativos/>

En la Figura 67 se observa la distribución de los nuevos difusores para los reactores biológicos que se obtuvo del programa Aqua Aero.

**Figura 67**

*Configuración de los nuevos difusores de los reactores biológicos*



Fuente: Autoras.

Por otro lado, se proponen difusores de la marca Passavant-Intech de tipo Roeflex HL EPDM (Ver Figura 68), de diámetro 320 mm, siendo en total 224 discos por cada tanque, o sea 448 discos para los dos reactores.

### Figura 68

*Difusores Roeflex HL EPDM de la empresa Passavant – Intech*



Fuente: Geoteck-Tierra SRL (2022,9 de febrero). *Difusores Ecoflex EPDM: componentes para el tratamiento de aguas residuales.* [https://15f8034cdff6595cbfa1-1dd67c28d3aade9d3442ee99310d18bd.ssl.cf3.rackcdn.com/8c05ec0cc751fb8795102fdc10264178/ecoflex\\_epdm\\_spanish.pdf](https://15f8034cdff6595cbfa1-1dd67c28d3aade9d3442ee99310d18bd.ssl.cf3.rackcdn.com/8c05ec0cc751fb8795102fdc10264178/ecoflex_epdm_spanish.pdf)

Una desventaja podría ser el costo ya que la inversión requerida para poder implementar los sopladores y difusores que sería de dos mil setecientos treinta y siete millones novecientos veinticuatro mil setecientos noventa y cinco de pesos colombianos (2'737.924.795 COP) en cuanto a equipamiento mecánico.

**Calidad del agua.** En este caso se quiso realizar la verificación de la calidad del agua saliendo de la planta con los reactores adicionales que se proponen para la misma. A continuación, en la Tabla 11, se muestran los datos obtenidos de la calidad del agua en el efluente:



**Tabla 11***Datos obtenidos del modelo optimizado*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>	<b>Res. 631 de 2015</b>
SST	mg/L	11.38	100
SSV	mg/L	6.87	No indica
DBO5c	mg/L	3.51	No indica
DQO	mg/L	34.20	200
OD	mgO2/L	2.00	No indica

Fuente: Autoras.

Como se puede observar en la Tabla 11, los parámetros de calidad cumplirían con la normatividad vigente, además de ello, se puede observar que los valores obtenidos son mucho menores que los del modelo propuesto anteriormente lo que nos indica que el sistema es óptimo.

### Conclusiones

Se evaluó el sistema de tratamiento de la PTAR de Paipa mediante el simulador de procesos biológicos GPS-X y los softwares de pre dimensionamiento Capdetworks y Aqua Aero, con los cuales se detectaron las falencias existentes en el sistema y con ello se propusieron los escenarios de optimización para mejorar los procesos llevados a cabo en la misma.

La operación actual de la PTAR tiene deficiencias en la operación de los reactores, ya que su población de bacterias está decreciendo, debido a problemas en el sistema de aireación y difusión dado que han cumplido con su vida útil, ya que uno de los equipos se encuentra fuera de servicio y el otro no cuenta con un control adecuado de la cantidad de aire que se debe suministrar a los reactores y, por ende, se afecta dichos microorganismos. Adicional a esto, en algunas ocasiones no se cuenta con la cantidad de agua residual requerida para el funcionamiento de los equipos y, por tanto, no se hace un continuo tratamiento del agua. Además, hay la disponibilidad de equipos para su funcionamiento los cuales ayudan a optimizar el tratamiento del agua, pero, no se utilizan debido a la mala ubicación de los mismos, ejemplo, el filtro percolador. También es importante considerar que con el crecimiento del municipio aumentó la población y trae como consecuencia un incremento en el caudal del agua residual que ingresa a la planta y por ende se debe disponer el agua sin tratar al río Chicamocha generando afectaciones en la calidad del mismo, por ello, se requiere la expansión del sistema para tratarlo (reactores biológicos y sedimentadores).

Mediante la implementación del software GPS-X y el modelo AMS1 se logró esquematizar y analizar tres escenarios. En primer lugar, el escenario actual para determinar el funcionamiento de la planta y poder identificar las falencias de la misma, para luego obtener los escenarios de optimización, los cuales consisten en, el cambio de los sopladores y difusores de los reactores biológicos, por otro lado, adicionar la recirculación del agua que sale del espesador hacia los tanques de aireación, y, por último, es necesario que se realice una expansión de la planta, efectuando la construcción de dos tanques adicionales con un volumen de 1310 m<sup>3</sup> cada uno con sus respectivos sedimentadores secundarios para el tratamiento del caudal de exceso que se vierte al río Chicamocha sin tratamiento.

El cambio de los sopladores y difusores es necesario para la optimización del sistema porque es evidente que ya cumplió su vida útil, además de que son bastante ruidosos y pueden causar enfermedades futuras en los operarios de la planta, para prevenir esto, se plantea el cambio de los sopladores actuales por unos de lóbulos rotativos de la empresa Kaeser de perfil Omega 43 Plus, una ventaja es que se podrían disponer en el mismo lugar que se encuentran los actuales y los difusores por unos Difusores Roeflex de la empresa Passavant – Intech. Por otro lado, para los dos tanques de aireación futuros (volumen de 1310 m<sup>3</sup>) se proponen unos sopladores de lóbulos rotativos de la empresa Kaeser de perfil Omega 52 Plus y unos Difusores Roeflex de la empresa Passavant – Intech.

### **Recomendaciones**

Se propone el cambio de sopladores y difusores en los tanques de aireación actuales, los cuales se harían por unos sopladores de lóbulos rotativos de la empresa Kaeser de perfil Omega 43 plus y su potencia nominal debe ser de 22 kW y su potencia de soplado de 17.97 kW, además de ello, se implementará un soplador para cada tanque más uno de reserva, adicionalmente, se debe realizar la modificación de los difusores por unos Difusores Roeflex de la empresa Passavant-Intech, en donde se necesitaran 336 difusores para cada tanque. Además, se sugiere la ampliación de la planta como escenario futuro mediante la construcción de dos tanques de aireación (1310 m<sup>3</sup>) con sus respectivos sedimentadores secundarios, con el fin de lograr una mejora de la misma. Para los dos nuevos tanques se requieren unos sopladores de lóbulos rotativos de la empresa Kaeser de perfil Omega 52 plus y su potencia nominal de ser de 30 kW y su potencia de soplado de 25.38 kW, se implementará un soplador para cada tanque más uno de reserva, y finalmente, se necesitarían unos Difusores Roeflex HL EPDM de la empresa Passavant-Intech con 224 difusores para cada tanque. En total, se requeriría para los tanques actuales: dos sopladores y 672 difusores, para los dos tanques futuros es necesario: dos sopladores y 448 difusores, en ambos casos se requiere tener un soplador de reserva.

Una limitación que evita que se desarrollen las propuestas de mejora que se mencionan a lo largo de este documento es la inversión significativa de dinero que se debe hacer por parte de la empresa de servicios Red Vital Paipa S.A. E.S.P, es importante tener en cuenta que los softwares en los que se realizaron las modelaciones son canadienses y la conversión de dólares a pesos aumenta significativamente los costos. Sin embargo, de contar con el presupuesto y de poner en marcha el proyecto, también se debe considerar que incrementará la factura del servicio a la población de Paipa para solventar la deuda a lo largo de 25 años que es a lo que se planea el funcionamiento. No obstante, al realizar los cambios y mejoras, se obtendrán beneficios a largo plazo, ya sean, económicos, sociales y ambientales, debido a que anualmente se reducirán costos de energía, mantenimiento, mano de obra, costos operativos y además de ello, se podrá tratar toda el agua residual que ingresa a la planta mejorando así los objetivos de calidad para dicho tramo y, por último, la comunidad que hace uso del río Chicamocha para las diversas actividades cotidianas se verá beneficiada.

### Referencias

- Alcaldía Municipal de Paipa. (2013). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres*. (Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres -CMGRD). [https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/28456/PMGRD%20 Paipa Boyaca.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/28456/PMGRD%20Paipa%20Boyaca.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Aquamarket. (s.f.). *Aireación extendida*. <https://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=45>
- Barreto, P., Leyva, M., y Espinoza, G. (2010). *Protocolo de monitoreo de la calidad del agua*. (Protocolo de monitoreo de agua). Universidad Nacional: Santiago Antúnez de Mayolo. [https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user\\_upload/p\\_biorem/education/research/protocols/Protocolo\\_Agua.pdf](https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/protocols/Protocolo_Agua.pdf)
- Buitrón, G., Reino, C., y Carrera, J. (2018). *Manual técnico sobre tecnologías biológicas aerobias aplicadas al tratamiento de Aguas Residuales industriales* - Red Tritón. [http://www.cyted.org/sites/default/files/tratamiento\\_aerobio\\_de\\_aguas\\_residuales.pdf](http://www.cyted.org/sites/default/files/tratamiento_aerobio_de_aguas_residuales.pdf)
- Cartón, A. (2021, 21 de enero). *Organismos heterótrofos: qué son, características y ejemplos*. <https://www.ecologiaverde.com/organismos-heterotrofos-que-son-caracteristicas-y-ejemplos-2332.html>
- Deatony, M. y Winebrake, J. (2000). *Dynamic modeling of Environmental Systems*. Springer Verlag.
- Depuración de Aguas Residuales. (s.f.). <https://www.cbm.uam.es/jalopez/SeminariosVarios/ERARtexto.htm>
- Geotek-Tierra SRL (2022, 9 de febrero). *Difusores Ecoflex EPDM: componentes para el tratamiento de Aguas Residuales*. [https://15f8034cdff6595cbfa1-1dd67c28d3aade9d3442ee99310d18bd.ssl.cf3.rackcdn.com/8c05ec0cc751fb8795102fdc10264178/ecoflex\\_epdm\\_spanish.pdf](https://15f8034cdff6595cbfa1-1dd67c28d3aade9d3442ee99310d18bd.ssl.cf3.rackcdn.com/8c05ec0cc751fb8795102fdc10264178/ecoflex_epdm_spanish.pdf)
- HATCH. (2022, 13 de enero). *GPS-X: The industry's most relied-upon software for wastewater treatment modelling and simulation*. <https://www.hatch.com/hydromantis/gps-x/#/>

- Henze, M., Gujer, W., Mino, T., y Van Loosdrecht, M. (2000). *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d, and ASM3. IWA Scientific and Technical* (Report no. 9). IWA Publishing.
- KAESER. (2022a). *Compresores y Sopladores de Lóbulos rotativos resistentes* – Kaeser Compresores. <https://co.kaeser.com/productos-y-soluciones/sopladores/sopladores-de-lobulos-rotativos/>
- KAESER. (2022b, 9 de febrero). *Sopladores a baja Presión Serie omega* – Kaeser Compresores. <https://ar.kaeser.com/download.ashx?id=tcm:42-5944>
- Makinia, J. (2010). *Mathematical modelling and computer simulation of active sludge systems*. IWA Publishing.
- Metcalf y Eddy. (2014). *Wastewater Engineering, Treatment and Resource Recovery*. (5th ed.). McGraw Hill Education.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015, 17 de marzo). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. [Resolución 631 de 2015] DO: 49.486
- Minitab. (2021). *Prueba de normalidad*. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/test-for-normality/>
- Osorio, A. (2022, 13 de enero). *La Importancia del control de variables en aguas residuales*. – Serviclоро. <https://serviclоро.com/blog-tratamiento-de-aguas-bombas-dosificadoras/148-la-importancia-del-control-de-variables-en-aguas-residuales>
- Passavant. (2022, 9 de febrero). *Passavant® Fine Bubble aeration ROEFLEX® BIOFLEX®*. [https://www.passavant-geiger.com/fileadmin/Resources/Passavant\\_Geiger\\_Noggerath/Products/Documents/Passavant\\_Fine\\_Bubble\\_Aeration\\_Roeflex\\_Bioflex/AS\\_Passavant\\_Fine\\_Bubble\\_Roeflex\\_Bioflex\\_EN\\_WEB.pdf](https://www.passavant-geiger.com/fileadmin/Resources/Passavant_Geiger_Noggerath/Products/Documents/Passavant_Fine_Bubble_Aeration_Roeflex_Bioflex/AS_Passavant_Fine_Bubble_Roeflex_Bioflex_EN_WEB.pdf)
- Von Sperling, M., Verbyla, M. E., y Oliveira, S. M. (2020). *Assessment of Treatment Plant Performance and Water Quality Data: A Guide for Students, Researchers and Practitioners*. (1st ed.). IWA publishing.

Zarza, L. (2019). *¿Qué son las aguas residuales?* – iagua.  
<https://www.iagua.es/respuestas/que-son-aguas-residuales#:~:text=Las%20aguas%20residuales%20son%20cualquier,negativamente%20por%20la%20influencia%20antropogénica>

**Anexos**



**Anexo B. Base de Datos (Adjunto en CD ROOM)**

**Anexo C. Reporte de costos de Aqua Aero para el escenario actual.**

## Consultoría

Costos de consultoría	<b>5,000.00</b>	<b>\$</b>
-----------------------	-----------------	-----------

## Construcción - Sala de aireadores, sótano

<b>Construcción - Sala de aireadores, sótano</b>		
Punto de referencia, edificio	250	\$/m <sup>3</sup>
Volumen, sala de soplantes	54	m <sup>3</sup>
Costos de construcción 1		<b>13,500.00</b>
		<b>\$</b>

## Construcción - Trabajos de Excavación, Tuberías

<b>Construcción - Trabajos de Excavación, Tuberías</b>		
Referencia, Excavación	100	\$
Excavación	10	m <sup>3</sup>
Costos de construcción 2		<b>1,000.00</b>
		<b>\$</b>

## Equipamiento mecánico

<b>Equipamiento mecánico</b>						
			Precio por unidad		Total	
Soplador Kaeser OMEGA 82 Plus / Aggregat HB 950 Compact	2	No	1	\$	2	\$
Tuberías de conexión DN250, V2A	2	m	65	\$	130	\$
Compuerta de cierre DN250	2	No	250	\$	500	\$

Tubería colectora DN350	1	m	100	\$	100	\$
Compuerta de cierre DN350	1	No	350	\$	350	\$
Tubería de entrada DN250	2	m	70	\$	140	\$
Compuerta de cierre DN250	2	No	250	\$	500	\$
Tubería de Distribución DN250	40	m	65	\$	2,600.00	\$
Compuerta de cierre DN250	4	No	250	\$	1,000.00	\$
Tubo colector DN80	64	m	18.7	\$	1,196.80	\$
Compuerta de cierre DN80	16	No	80	\$	1,280.00	\$
Cuadrícula	16	No	1	\$	16	\$
Discos de aireación	768	No	1	\$	768	\$
Passavant-Intech Roeflex Silikon						
Dispositivo de eliminación	2	No	1	\$	2	\$
Costos Equipo Mecánico.					<b>8,584.80</b>	<b>\$</b>

---

## Ingeniería Eléctrica

<b>Ingeniería Eléctrica</b>		
Tablero de interruptores	50,000.00	\$
Cableado	15,000.00	\$
Equipo de medición	10,000.00	\$
<b>Costos Equipo Eléctrico.</b>	<b>75,000.00</b>	<b>\$</b>

## Resumen de inversión

<b>Resumen de inversión</b>		
Consultante	5,000.00	\$
Actividades de construcción	14,500.00	\$
Equipamiento mecánico	8,584.80	\$
Ingeniería Eléctrica	75,000.00	\$
<b>Invertir, Cantidad</b>	<b>103,084.80</b>	<b>\$</b>

## Costos de operación

<b>Costos de energía</b>		
Tarifa PS	0.2	\$/kWh
Tiempo de aireación	0	h
<b>Soplador</b>		
Demanda de oxígeno SOTR	212.61	kgO <sub>2</sub> /d
Factor de demanda de O <sub>2</sub> promedio	0.86	-
Demanda media de O <sub>2</sub> SOTR <sub>m</sub>	182.84	kgO <sub>2</sub> /d
Rendimiento de oxígeno, SAEBlower	2.65	kgO <sub>2</sub> /kWh
Consumo medio de energía	68.99	kW
Consumo de energía, por día	0	kWh/d
Consumo de energía, p.a.	0	kWh/a
Costos de energía, por día	0	\$/d
Costos de energía, p.a.	0	\$/a

## Costos nominales de reinversión

<b>Costos nominales de reinversión</b>			
Tiempo de vida	Descripción	Invertir	Reinvertir Nominal
	Consultante	5,000.00 \$	0.00 \$
25.0 a	Construcción - Sala de aireadores, sótano	13,500.00 \$	0.00 \$
25.0 a	Construcción - Trabajos de Excavación, Tuberías	1,000.00 \$	0.00 \$
7.0 a	Equipo Mecánico 1		
	Aireador Passavant-Intech	768.00 \$	
	Roeflex Silikon		
	Suma Intermedia	768.00 \$	2,304.00 \$
10.0 a	Equipo Mecánico 2		
	Cuadrícula	16.00 \$	
	Dispositivo de eliminación	2.00 \$	
	Suma Intermedia	18.00 \$	36.00 \$
12.5 a	Equipo Mecánico 3		
	Válvula DN250	500.00 \$	
	Válvula DN350	350.00 \$	
	Válvula DN250	500.00 \$	
	Válvula DN250	1,000.00 \$	
	Válvula DN80	1,280.00 \$	
	Suma Intermedia	3,630.00 \$	3,630.00 \$
20.0 a	Equipo Mecánico 4		
	Soplador Kaeser OMEGA 82 Plus / Aggregat HB 950 Compact	2.00 \$	
	Suma Intermedia	2.00 \$	2.00 \$
25.0 a	Equipo Mecánico 5		
	Conexión de tuberías, Kaeser OMEGA 82 Plus / Aggregat HB 950 Compact	130.00 \$	
	Tubería colectora	100.00 \$	
	Tubería de entrada	140.00 \$	
	Tubería de distribución	2,600.00 \$	
	Tubería de cabecera	1,196.80 \$	
	Suma Intermedia	4,166.80 \$	0.00 \$
20.0 a	Ingeniería Eléctrica	65,000.00 \$	65,000.00 \$
10.0 a	Equipo de medición	10,000.00 \$	20,000.00 \$

## Valor actual de los costos de reinversión

<b>Valor actual de los costos de reinversión</b>				
		Valor actual	DFAKE	nominal
Equipo Mecánico 1				
1.Reinvertir	7.0 a	768.00 \$	0.8131	624.45 \$
2.Reinvertir	14.0 a	768.00 \$	0.6611	507.74 \$
3.Reinvertir	21.0 a	768.00 \$	0.5375	412.84 \$
Equipo Mecánico 2				
1.Reinvertir	10.0 a	18.00 \$	0.7441	13.39 \$
2.Reinvertir	20.0 a	18.00 \$	0.5537	9.97 \$
Equipo Mecánico 3				
1.Reinvertir	12.5 a	3,630.00 \$	0.6911	2,508.66 \$
Equipo Mecánico 4				
1.Reinvertir	20.0 a	2.00 \$	0.5537	1.11 \$
<b>Ingeniería</b>				
<b>Eléctrica</b>				
1.Reinvertir	20.0 a	65,000.00 \$	0.5537	35,988.92 \$
Equipo de medición				
1.Reinvertir	10.0 a	10,000.00 \$	0.7441	7,440.94 \$
2.Reinvertir	20.0 a	10,000.00 \$	0.5537	5,536.76 \$
<b>Suma</b>		<b>90,972.00 \$</b>		<b>53,044.78 \$</b>
<b>Reinvertir</b>				

## Descripción general Costos del ciclo de vida del proyecto

<b>Descripción general Costos del ciclo de vida del proyecto</b>				
	Nominal		Valor actual	
Invertir	103,084.80	\$	103,084.80	\$
Reinvertir	90,972.00	\$	53,044.78	\$
Costos de Operación	0	\$/a	0	\$/a
<b>Costos del ciclo de vida del proyecto</b>			<b>156,129.58</b>	<b>\$/a</b>

**Anexo D. Reporte de costos de Capdetworks para el escenario futuro.**

Aguas residuales afluentes

Costos de construcción

<b>Costos de construcción</b>		
Costo de mano de obra de administración	24,000,000,000	COP
Costo de mano de obra de laboratorio	6,560,000,000	COP
Costo de mano de obra de operación de proceso unitario	23,300,000,000	COP
Costo de mano de obra de mantenimiento de procesos unitarios	53,900,000,000	COP

Costos laborales

<b>Costos laborales</b>		
Costo de mano de obra de administración	53,400,000	COP/año
Costo de mano de obra de laboratorio	477,000,000	COP/año
Costo de mano de obra de operación de proceso unitario	270,000,000	COP/año
Costo de mano de obra de mantenimiento de procesos unitarios	373,000,000	COP/año
Costos laborales totales	2,170,000,000	COP/año

Resumen de costos

<b>Resumen del proyecto</b>		
Valor actual	93,400,000,000	COP
Costo total del proyecto	53,900,000,000	COP
Costo total de mano de obra de operación	1,800,000,000	COP/año
Costo total de mano de obra de mantenimiento	373,000,000	COP/año
Costo total de materiales	446,000,000	COP/año
Costo químico total	0	COP/año
Costo total de energía	233,000,000	COP/año
Costo total de amortización	4,920,000,000	COP/año

<b>Procesos</b>	<b>Construcción (COP)</b>	<b>Operación (COP/año)</b>	<b>Mantenimiento (COP/año)</b>	<b>Material (COP/año)</b>	<b>Químicos (COP/año)</b>	<b>Energía (COP/año)</b>	<b>Amortización (COP/año)</b>
Divisor de aguas residuales de 2 vías	0	0	0	0	0	0	0
Lodos activados de aireación extendida	2340000000	282000000	121000000	98000000	0	113000000	216000000
Lodos activados de aireación extendida(1)	2340000000	282000000	121000000	98000000	0	113000000	216000000
Clarificador secundario	1630000000	120000000	57600000	15900000	0	3080000	157000000
Clarificador secundario(1)	1630000000	120000000	57600000	15900000	0	3080000	157000000
Engrosamiento por gravedad	367000000	19600000	15100000	3670000	0	1470000	35400000
Divisor de aguas residuales de 2 vías(1)	0	0	0	0	0	0	0
Prensa de filtro	13000000000	441000000	0	0	0	0	1320000000
Acarreo y Relleno de Tierras	1150000000	3750000	0	214000000	0	0	247000000
Efluente	0	0	0	0	0	0	0
Sistema de soplado	1570000000	0	0	0	0	0	132000000
Otros costos	29900000000	530000000	0	0	0	0	2440000000



## Resumen de otros costos para el diseño

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Otros costos		
Cantidades		
Tierra requerida	4.05	Ha
Horas de trabajo de administración	259	hr/año
Horas de trabajo de laboratorio	2310	hr/año
Costos		
<b>COSTOS DIRECTOS</b>		
Movilización	566000000	COP
Preparación del sitio	1040000000	COP
Sitio eléctrico	1470000000	COP
tubería de jardín	1020000000	COP
Instrumentación y control	671000000	COP
Edificios de laboratorio y administración	1800000000	COP
Costos directos totales de construcción	6560000000	COP
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>		
costo de la tierra	800000000	COP
Costo misceláneo	1760000000	COP
Costo legal	703000000	COP
Tarifa de diseño de ingeniería	5280000000	COP
Costo de inspección	703000000	COP
Contingencia	3520000000	COP
Técnico	703000000	COP
Interés durante la construcción	5290000000	COP
Ganancia	4590000000	COP
Costos indirectos totales de construcción	23300000000	COP
Total de otros costos de construcción	29900000000	COP
<b>COSTES LABORALES</b>		
Costo de mano de obra de administración	53400000	COP/año
Costo de mano de obra de laboratorio	477000000	COP/año

## Resumen del sistema de suministro de aire

<b>Resumen del sistema de suministro de aire</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Sistema de soplado para toda la planta		
Información de diseño		
Capacidad mínima de flujo de aire	3590	N m <sup>3</sup> /hr
Factor de seguridad	1.5	
Capacidad de flujo de aire solicitada	5380	N m <sup>3</sup> /hr
Capacidad total de sopladores	5380	N m <sup>3</sup> /hr
Número de sopladores en uso	1	
Número total de sopladores	2	
Capacidad de sopladores individuales	5380	N m <sup>3</sup> /hr
Costo estimado de un ventilador instalado	486000000	COP
Área de construcción del soplador	93.6	m <sup>2</sup>
Costos		
Costo de construcción y equipo	1570000000	COP
Costo del soplador instalado	972000000	COP
Costo de construcción	444000000	COP
Costos misceláneos	156000000	COP
Costo de mano de obra operativa	0	COP/año
Costo de mano de obra del mantenimiento	0	COP/año
Costo de materiales y suministros	0	COP/año
Costo químico	0	COP/año
Costo energético	0	COP/año
Costo de amortización	132000000	COP/año
notas		
Los costos de energía se muestran en los procesos unitarios individuales que requieren aire		

Aguas residuales afluentes

Divisor de aguas residuales de 2 vías

Datos de salida del diseño

<b>Datos de salida del diseño</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Divisor de flujo de aguas residuales de 2 vías		
Información de diseño		
Flujo a la primera división (promedio)	1300	m <sup>3</sup> /d
Flujo a la primera división (pico)	1300	m <sup>3</sup> /d
Flujo a la primera división (mínimo)	1300	m <sup>3</sup> /d
Flujo a la segunda división (promedio)	1300	m <sup>3</sup> /d
Flujo a la segunda división (pico)	1300	m <sup>3</sup> /d
Flujo a la segunda división (mínimo)	1300	m <sup>3</sup> /d
Costos		
Costo de construcción y equipo	0	COP
Costo de mano de obra operativa	0	COP/año
Costo de mano de obra del mantenimiento	0	COP/año
Costo de materiales y suministros	0	COP/año
Costo químico	0	COP/año
Costo energético	0	COP/año
Costo de amortización	0	COP/año

Lodos activados de aireación extendida

Datos de salida del diseño

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Lodos activados de aireación extendida		
Información de diseño		
Diseño de Carbono y Nitrificación		
Diseño SRT para diseño a temperatura invernal	25	d
Diseño SS	4610	g/m <sup>3</sup>
VSS calculado	3390	g/m <sup>3</sup>

Relación VSS:TSS calculada	0.736	mg VSS/mg SS
Volumen total de reactores	1310	m <sup>3</sup>
Longitud del tren paralelo	14	m
Ancho del tren paralelo	10	m
Profundidad del agua lateral	5	m
Número de baterías	1	
Número de trenes paralelos por batería	2	
Número de celdas dentro de un tren	1	
Número total de medianeras entre zonas	0	
Tiempo de retención hidráulica	23.9	hr
Relación F/M	0.0877	kg BOD/kg MLSS/d
Carga volumétrica de DBO	0.297	kg BOD/m <sup>3</sup> /d
Rendimiento observado (base VSS)	0.455	g VSS/g BOD
Rendimiento observado (base TSS)	0.617	g TSS/g BOD
Cantidad de alcalinidad requerida	284	gCaCO <sub>3</sub> /m <sup>3</sup>
Cantidad de lodos generados	241	kg/d
Tasa de reciclaje de lodos	1120	m <sup>3</sup> /d
Necesidad de nitrógeno para el crecimiento de la biomasa	13.5	g/m <sup>3</sup>
Necesidad de fósforo para el crecimiento de la biomasa	2.7	g/m <sup>3</sup>
Necesidad de oxígeno para satisfacer la demanda media	729	kg/d
Flujo de aire requerido para satisfacer la demanda promedio	1680	N m <sup>3</sup> /hr
Flujo de aire de diseño	21.4	N m <sup>3</sup> /min/1000 m <sup>3</sup>
Cantidades		
Mano de obra requerida	991	pers-hrs/año
Se requiere mano de obra de mantenimiento	481	pers-hrs/año
Energía eléctrica requerida	272000	kWh/año
Volumen de movimiento de tierras requerido	1050	m <sup>3</sup>

Volumen de losa de hormigón requerido	225	m <sup>3</sup>
Volumen de hormigón de pared requerido	177	m <sup>3</sup>
Longitud del pasamanos	52.4	m
Número de difusores por tren	265	
Cobertura de piso difusor de burbuja fina	7.77	%
Número de cabezales de brazo oscilante por tren	2	
Costos		
Costo de construcción y equipo	2040000000	COP
Costo de movimiento de tierras	43900000	COP
Costo de hormigón de pared	603000000	COP
Costo de hormigón de losa	412000000	COP
Costo de pasamanos	51600000	COP
Costo del equipo aireador instalado	458000000	COP
Costo de tubería de aire	270000000	COP
Costos misceláneos	202000000	COP
Costo de mano de obra operativa	204000000	COP/año
Costo de mano de obra del mantenimiento	74600000	COP/año
Costo de materiales y suministros	95900000	COP/año
Costo químico	0	COP/año
Costo energético	109000000	COP/año
Costo de amortización	188000000	COP/año
notas		
SRT mínimo de invierno no calculado, SRT de diseño especificado por el usuario		
Bombeo de reciclaje de lodos		
Información de diseño		
Tasa de bombeo diaria promedio	1120	m <sup>3</sup> /d
Capacidad total de bombeo	2250	m <sup>3</sup> /d
Capacidad de diseño por bomba	1120	m <sup>3</sup> /d
Número de bombas	3	
Número de baterías	1	

Capacidad de bombeo firme	1120	m <sup>3</sup> /d
Cantidades		
Mano de obra requerida	376	pers-hrs/año
Se requiere mano de obra de mantenimiento	301	pers-hrs/año
Energía eléctrica requerida	9970	kWh/año
Volumen de movimiento de tierras requerido	48	m <sup>3</sup>
Área de construcción de bombas	19.7	m <sup>2</sup>
Costos		
Costo de construcción y equipo	296000000	COP
Costo de movimiento de tierras	2010000	COP
Costo de construcción de la bomba	93200000	COP
Costo de la bomba instalada	156000000	COP
Costos misceláneos	45200000	COP
Costo de mano de obra operativa	77500000	COP/año
Costo de mano de obra del mantenimiento	46600000	COP/año
Costo de materiales y suministros	2070000	COP/año
Costo químico	0	COP/año
Costo energético	3990000	COP/año
Costo de amortización	28000000	COP/año

Lodos activados de aireación extendida (1)

Datos de salida del diseño

Descripción	Valor	Unidades
Lodos activados de aireación extendida		
Información de diseño		
Diseño de Carbono y Nitrificación		
Diseño SRT para diseño a temperatura invernal	25	d
Diseño SS	4610	g/m <sup>3</sup>
VSS calculado	3390	g/m <sup>3</sup>
Relación VSS:TSS calculada	0.736	mg VSS/mg SS

Volumen total de reactores	1310	m <sup>3</sup>
Longitud del tren paralelo	14	m
Ancho del tren paralelo	10	m
Profundidad del agua lateral	5	m
Número de baterías	1	
Número de trenes paralelos por batería	2	
Número de celdas dentro de un tren	1	
Número total de medianeras entre zonas	0	
Tiempo de retención hidráulica	23.9	hr
Relación F/M	0.0877	kg BOD/kg MLSS/d
Carga volumétrica de DBO	0.297	kg BOD/m <sup>3</sup> d
Rendimiento observado (base VSS)	0.455	g VSS/g BOD
Rendimiento observado (base TSS)	0.617	g TSS/g BOD
Cantidad de alcalinidad requerida	284	gCaCO <sub>3</sub> /m <sup>3</sup>
Cantidad de lodos generados	241	kg/d
Tasa de reciclaje de lodos	1120	m <sup>3</sup> /d
Necesidad de nitrógeno para el crecimiento de la biomasa	13.5	g/m <sup>3</sup>
Necesidad de fósforo para el crecimiento de la biomasa	2.7	g/m <sup>3</sup>
Necesidad de oxígeno para satisfacer la demanda media	729	kg/d
Flujo de aire requerido para satisfacer la demanda promedio	1680	N m <sup>3</sup> /hr
Flujo de aire de diseño	21.4	N m <sup>3</sup> /min/1000 m <sup>3</sup>
Cantidades		
Mano de obra requerida	991	pers-hrs/año
Se requiere mano de obra de mantenimiento	481	pers-hrs/año
Energía eléctrica requerida	272000	kWh/año
Volumen de movimiento de tierras requerido	1050	m <sup>3</sup>
Volumen de losa de hormigón requerido	225	m <sup>3</sup>

Volumen de hormigón de pared requerido	177	m <sup>3</sup>
Longitud del pasamanos	52.4	m
Número de difusores por tren	265	
Cobertura de piso difusor de burbuja fina	7.77	%
Número de cabezales de brazo oscilante por tren	2	
Costos		
Costo de construcción y equipo	2040000000	COP
Costo de movimiento de tierras	43900000	COP
Costo de hormigón de pared	603000000	COP
Costo de hormigón de losa	412000000	COP
Costo de pasamanos	51600000	COP
Costo del equipo aireador instalado	458000000	COP
Costo de tubería de aire	270000000	COP
Costos misceláneos	202000000	COP
Costo de mano de obra operativa	204000000	COP/año
Costo de mano de obra del mantenimiento	74600000	COP/año
Costo de materiales y suministros	95900000	COP/año
Costo químico	0	COP/año
Costo energético	109000000	COP/año
Costo de amortización	188000000	COP/año
notas		
SRT mínimo de invierno no calculado, SRT de diseño especificado por el usuario		
Bombeo de reciclaje de lodos		
Información de diseño		
Tasa de bombeo diaria promedio	1120	m <sup>3</sup> /d
Capacidad total de bombeo	2250	m <sup>3</sup> /d
Capacidad de diseño por bomba	1120	m <sup>3</sup> /d
Número de bombas	3	
Número de baterías	1	
Capacidad de bombeo firme	1120	m <sup>3</sup> /d



## Cantidades

Mano de obra requerida	376	pers-hrs/año
Se requiere mano de obra de mantenimiento	301	pers-hrs/año
Energía eléctrica requerida	9970	kWh/año
Volumen de movimiento de tierras requerido	48	m <sup>3</sup>
Área de construcción de bombas	19.7	m <sup>2</sup>

## Costos

Costo de construcción y equipo	296000000	COP
Costo de movimiento de tierras	2010000	COP
Costo de construcción de la bomba	93200000	COP
Costo de la bomba instalada	156000000	COP
Costos misceláneos	45200000	COP
Costo de mano de obra operativa	77500000	COP/año
Costo de mano de obra del mantenimiento	46600000	COP/año
Costo de materiales y suministros	2070000	COP/año
Costo químico	0	COP/año
Costo energético	3990000	COP/año
Costo de amortización	28000000	COP/año

## Clarificador secundario

## Datos de salida del diseño

Descripción	Valor	Unidades
Clarificador secundario		
Información de diseño		
Área de superficie	95.9	m <sup>2</sup>
Longitud del clarificador rectangular	7.92	m
Ancho de clarificador rectangular	6.1	m
Número de clarificadores por batería	2	

Número de baterías	1	
Tasa de carga de sólidos	117	kg/(m <sup>2</sup> ·d)
Tiempo de retención hidráulica	4.8	hr
Tasa de desbordamiento de la superficie diseñada	13.7	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d)
Longitud del vertedero	7.06	m
Volumen de lodos desechados	23.4	m <sup>3</sup> /d
Cantidades		
Mano de obra requerida	353	pers-hrs/año
Se requiere mano de obra de mantenimiento	202	pers-hrs/año
Energía eléctrica requerida	7500	kWh/año
Volumen de movimiento de tierras requerido	221	m <sup>3</sup>
Volumen de losa de hormigón requerido	40.9	m <sup>3</sup>
Volumen de hormigón de pared requerido	84.3	m <sup>3</sup>
Costos		
Costo de construcción y equipo	1500000000	COP
Costo de movimiento de tierras	9240000	COP
Costo de hormigón de pared	287000000	COP
Costo de hormigón de losa	74900000	COP
Costo del equipo instalado	901000000	COP
Costos misceláneos	229000000	COP
Costo de mano de obra operativa	72700000	COP
Costo de mano de obra del mantenimiento	31300000	COP/año
Costo de materiales y suministros	15000000	COP/año
Costo químico	0	COP/año
Costo energético	3000000	COP/año

Costo de amortización	145000000	COP/año
Bombeo de lodos residuales		
Información de diseño		
Tasa de bombeo diaria promedio	23.4	m <sup>3</sup> /d
Capacidad total de bombeo	23.4	m <sup>3</sup> /d
Capacidad de diseño por bomba	11.7	m <sup>3</sup> /d
Número de bombas	3	
Número de baterías	1	
Capacidad de bombeo firme	23.4	m <sup>3</sup> /d
Cantidades		
Mano de obra requerida	229	pers-hrs/año
Se requiere mano de obra de mantenimiento	170	pers-hrs/año
Energía eléctrica requerida	210	kWh/yr
Volumen de movimiento de tierras requerido	45.3	m <sup>3</sup>
Área de construcción de bombas	18.6	m <sup>2</sup>
Costos		
Costo de construcción y equipo	131000000	COP
Costo de movimiento de tierras	1900000	COP
Costo de construcción de la bomba	88100000	COP
Costo de la bomba instalada	20900000	COP
Costos misceláneos	19900000	COP
Costo de mano de obra operativa	47200000	COP/año
Costo de mano de obra del mantenimiento	26300000	COP/año
Costo de materiales y suministros	915000	COP/año
Costo químico	0	COP/año
Costo energético	83900	COP/año
Costo de amortización	12400000	COP/año

---

## Clarificador secundario (1)

## Datos de salida del diseño

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Aclaración Secundaria		
Información de diseño		
Área de superficie	95.9	m <sup>2</sup>
Longitud del clarificador rectangular	7.92	m
Ancho de clarificador rectangular	6.1	m
Número de clarificadores por batería	2	
Número de baterías	1	
Tasa de carga de sólidos	117	kg/(m <sup>2</sup> ·d)
Tiempo de retención hidráulica	4.8	hr
Tasa de desbordamiento de la superficie diseñada	13.7	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d)
Longitud del vertedero	7.06	m
Volumen de lodos desechados	23.4	m <sup>3</sup> /d
Cantidades		
Mano de obra requerida	353	pers-hrs/año
Se requiere mano de obra de mantenimiento	202	pers-hrs/año
Energía eléctrica requerida	7500	kWh/año
Volumen de movimiento de tierras requerido	221	m <sup>3</sup>
Volumen de losa de hormigón requerido	40.9	m <sup>3</sup>
Volumen de hormigón de pared requerido	84.3	m <sup>3</sup>
Costos		

Costo de construcción y equipo	1500000000	COP
Costo de movimiento de tierras	9240000	COP
Costo de hormigón de pared	287000000	COP
Costo de hormigón de losa	74900000	COP
Costo del equipo instalado	901000000	COP
Costos misceláneos	229000000	COP
Costo de mano de obra operativa	72700000	COP/año
Costo de mano de obra del mantenimiento	31300000	COP/año
Costo de materiales y suministros	15000000	COP/año
Costo químico	0	COP/año
Costo energético	3000000	COP/año
Costo de amortización	145000000	COP/año
Bombeo de lodos residuales		
Información de diseño		
Tasa de bombeo diaria promedio	23.4	m <sup>3</sup> /d
Capacidad total de bombeo	23.4	m <sup>3</sup> /d
Capacidad de diseño por bomba	11.7	m <sup>3</sup> /d
Número de bombas	3	
Número de baterías	1	
Capacidad de bombeo firme	23.4	m <sup>3</sup> /d
Cantidades		
Mano de obra requerida	229	pers-hrs/año
Se requiere mano de obra de mantenimiento	170	pers-hrs/año
Energía eléctrica requerida	210	kWh/año
Volumen de movimiento de tierras requerido	45.3	m <sup>3</sup>
Área de construcción de bombas	18.6	m <sup>2</sup>
Costos		
Costo de construcción y equipo	131000000	COP

Costo de movimiento de tierras	1900000	COP
Costo de construcción de la bomba	88100000	COP
Costo de la bomba instalada	20900000	COP
Costos misceláneos	19900000	COP
Costo de mano de obra operativa	47200000	COP/año
Costo de mano de obra del mantenimiento	26300000	COP/año
Costo de materiales y suministros	915000	COP/año
Costo químico	0	COP/año
Costo energético	83900	COP/año
Costo de amortización	12400000	COP/año

## Engrosamiento por gravedad

## Datos de salida del diseño

Descripción	Valor	Unidades
Engrosamiento por gravedad		
Información de diseño		
Concentración inicial	1	%
Concentración espesa	5	%
Carga masiva	48.8	kg/(m <sup>2</sup> ·d)
Carga hidráulica	1.61	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d)
Tiempo de retención hidráulica	41	hr
Número de tanques	1	
Volumen del tanque	80	m <sup>3</sup>
Profundidad	2.74	m
Superficie por tanque	29.2	m <sup>2</sup>
Diámetro del tanque	6.1	m
Cantidades		
Cantidad de lodos generados	468	kg/d

Volumen de lodo espesado	8.03	m <sup>3</sup> /d
Mano de obra requerida	95.2	pers-hrs/año
Se requiere mano de obra de mantenimiento	97.2	pers-hrs/año
Energía eléctrica requerida	3690	kWh/año
Volumen de movimiento de tierras requerido	134	m <sup>3</sup>
Espesor de losa	25.8	cm
Volumen de losa de hormigón requerido	11.4	m <sup>3</sup>
espesor de pared	29.2	cm
Volumen de hormigón de pared requerido	20.7	m <sup>3</sup>
Costos		
Costo de construcción y equipo	367000000	COP
Costo de movimiento de tierras	5620000	COP
Costo de hormigón de pared	70500000	COP
Costo de hormigón de losa	20800000	COP
Costo del equipo instalado	214000000	COP
Costos misceláneos	56000000	COP
Costo de mano de obra operativa	19600000	COP/año
Costo de mano de obra del mantenimiento	15100000	COP/año
Costo de materiales y suministros	3670000	COP/año
Costo químico	0	COP/año
Costo energético	1470000	COP/año
Costo de amortización	35400000	COP/año

---

## Divisor de aguas residuales de 2 vías (1)

## Datos de salida del diseño

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Divisor de flujo de aguas residuales de 2 vías		
Información de diseño		
Flujo a la primera división (promedio)	19.4	m <sup>3</sup> /d
Flujo a la primera división (pico)	19.4	m <sup>3</sup> /d
Flujo a la primera división (mínimo)	19.4	m <sup>3</sup> /d
Flujo a la segunda división (promedio)	19.4	m <sup>3</sup> /d
Flujo a la segunda división (pico)	19.4	m <sup>3</sup> /d
Flujo a la segunda división (mínimo)	19.4	m <sup>3</sup> /d
Costos		
Costo de construcción y equipo	0	COP
Costo de mano de obra operativa	0	COP/año
Costo de mano de obra del mantenimiento	0	COP/año
Costo de materiales y suministros	0	COP/año
Costo químico	0	COP/año
Costo energético	0	COP/año
Costo de amortización	0	COP/año



## Filtro prensa

## Datos de salida del diseño

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Filtro prensa		
Información de diseño		
Sólidos secos totales producidos	401	kg/d
Peso de la torta de filtración producida	892	kg/d
volumen de la torta	0.856	m <sup>3</sup> /d
Número de cámaras por día	15.1	
Número de ciclos por día	4	
Número de cámaras requeridas	3.78	
Costos		
Costo de construcción y equipo	13000000000	COP
Costo de mano de obra operativa	441000000	COP/año
Costo de mano de obra del mantenimiento	0	COP/año
Costo de materiales y suministros	0	COP/año
Costo químico	0	COP/año
Costo energético	0	COP/año
Costo de amortización	1320000000	COP/año
notas		
El modelo de costo de capital del filtro prensa no es válido a menos de 1,5 MGD (EE. UU.)		
Costo de capital basado en flujo de 1.5 MGD (EE. UU.)		

## Acarreo y Relleno de Tierras

## Datos de salida del diseño

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Acarreo de Lodos y Relleno de Tierras		
Información de diseño		
Volumen de lodo acarreado	0.891	m <sup>3</sup> /d
Capacidad del camión	14.5	m <sup>3</sup>
Tiempo de ida y vuelta al sitio de eliminación	1	hr
Tiempo de carga de camiones	0.75	hr
Horas de operación por día	8	hr
Número de camiones necesarios	1	
Distancia al sitio de eliminación	16.1	km
Cantidades		
Volumen total de lodos transportados	0.891	m <sup>3</sup> /d
Máximo tiempo de inactividad anticipado del vertedero	30	d
Altura prevista de almacenamiento de lodos	2.44	m
Cobertizo de almacenamiento de lodos	11	m <sup>2</sup>
Ancho de la losa de la caseta de almacenamiento de lodos	2.34	m
Longitud de la losa de la caseta de almacenamiento de lodos	4.68	m
Volumen de movimiento de tierras requerido	13	m <sup>3</sup>
Volumen de losa de hormigón requerido	6.33	m <sup>3</sup>
Superficie del techo de dosel	11	m <sup>2</sup>
Distancia de transporte de ida y vuelta	32.2	km

Ida y vuelta por día por camión	1	
Distancia recorrida al año por camión	8050	km
Lodo acarreado	935	kg/d
Mano de obra requerida	18.2	pers-hrs/yr
Costo de relleno sanitario	141000000	COP/año
Costos		
Costo de construcción y equipo	1150000000	COP
Costo de movimiento de tierras	544000	COP
Costo de hormigón de losa	11600000	COP
Costo del techo de dosel	9440000	COP
Costo del vehículo	1130000000	COP
Costo de mano de obra operativa	3750000	COP/año
Costo de mano de obra del mantenimiento	0	COP/año
Costo de materiales y suministros	214000000	COP/año
Costo químico	0	COP/año
Costo energético	0	COP/año
Costo de amortización	247000000	COP/año

### Resumen

Diseño Nombre	Valor presente (COL)	Proyecto (COL)	Operación (COL/yr)	Mantenimiento (COL/yr)	Material (COL/yr)	Químico (COL/yr)	Energía (COL/yr)	Amortización (COL/yr)
Futuro	9340000 0000	5390000 0000	1800000 000	3730000 00	4460000 00	0	2330000 00	4920000 000

**Anexo E. Reporte de costos de Aqua Aero para el escenario futuro**

## Invertir

<b>Consultoría</b>			
Costos de consultoría			<b>18,646.700</b> \$
<b>Construcción - Sala de aireadores, sótano</b>			
Punto de referencia, edificio	250	\$/m <sup>3</sup>	
Volumen, sala de soplantes	54	m <sup>3</sup>	
Costos de construcción 1			<b>50,346.090</b> \$
<b>Construcción - Trabajos de Excavación, Tuberías</b>			
Referencia, Excavación	100	\$	
Excavación	10	m <sup>3</sup>	
Costos de construcción 2			<b>3,729.340</b> \$

## Equipamiento mecánico

<b>Equipamiento mecánico</b>						
				Precio por unidad	Total	
Soplador Kaeser OMEGA 52 Plus / Aggregat EB 290 Compact	2	No		100 \$	200	\$
Tuberías de conexión	2	m		5,000.00 \$	10,000.00	\$

## DN200, V2A

Compuerta de cierre DN200	2	No	20,000.0	\$	40,000.00	\$
Tubería colectora DN250	1	m	6,500.00	\$	6,500.00	\$
Compuerta de cierre DN250	1	No	25,000.0	\$	25,000.00	\$
Tubería de entrada DN200	2	m	5,500.00	\$	11,000.00	\$
Compuerta de cierre DN200	2	No	20,000.0	\$	40,000.00	\$
Tubería de Distribución DN200	48.	m	5,000.00	\$	242,000.00	\$
Compuerta de cierre DN200	4	No	20,000.0	\$	80,000.00	\$
Tubo colector DN100	36	m	5,500.00	\$	198,000.00	\$
Compuerta de cierre DN100	8	No	10,000.0	\$	80,000.00	\$
Cuadrícula	8	No	1	\$	8	\$
Discos de aireación Passavant-Intech Roeflex HL EPDM	448	No	1	\$	448	\$
Dispositivo de eliminación	2	No	1	\$	2	\$
<b>Costos Equipo</b>					<b>2'734,195.455.7</b>	<b>\$</b>
<b>Mecánico.</b>					<b>2</b>	

Eficiencia de Oxígeno escenario futuro

Soplador

Pos	No	Soplador	Mecanogra fiar	$\eta$	Mech. Pérdi das	FU Pérdidas	PK	PAe l	PAel Total
				%	%	%	kW	kW	kW

1	2	Roots Blower	Kaeser	84,	2.0	-	2,53	30.6	61.1
			OMEGA 52	67			8.0		
			Plus /						
			Aggregat						
			EB 290						
			Compact						
Total	2	-	-	-	-	-	-	-	61.1

## Oxígeno Rendimiento

Descripción	Valor	Unidades
Profundidad de aireación (hD)	4.2	m
Volumen de aire, todos los ventiladores (QL, total)	2,674.87	m <sup>3</sup> /h
Especificaciones. Capacidad de transferencia de O <sub>2</sub> , operación (SSOTE)	19.0	gO <sub>2</sub> /(Nm <sup>3</sup> *m)
Transferencia de Oxígeno, Operación Cond. (SOTR)	213.45	kgO <sub>2</sub> /h
Rendimiento de oxígeno, soplador (SAE, ventilador)	3.49	kgO <sub>2</sub> /kWh

## Costos de operación escenario futuro

Descripción	Valor	Unidades
Tarifa de energía	0.20	\$/kWh
Tiempo de Aireación	0.00	h
<b>Soplador</b>		

---

Demanda de oxígeno SOTR	134.08	kgO <sub>2</sub> /d
Promedio de O <sub>2</sub> -Demanda, (SOTRm)	115.31	kgO <sub>2</sub> /d
Factor promedio O <sub>2</sub> -Demanda	0.86	-
Rendimiento de oxígeno, (SAEBlower)	3.49	kgO <sub>2</sub> /kWh
Consumo medio de energía	33.03	kW
Consumo de energía, todos los ventiladores, (PABlower)	61.1	kW

---