



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE GRADO:

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CICLO DE VIDA DEL PROCESO DE TRATAMIENTO CONVENCIONAL Y PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA DE UNA INDUSTRIA TEXTIL, A PARTIR DE LA SIMULACIÓN DE LOS SOFTWARE GPS-X 7.0.1 Y GABI EDUCATION.

MODALIDAD:

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.

PRESENTADO POR:

MARÍA ALEJANDRA CÉSPEDES ARCILA **CÓDIGO:** 507071
JENNYFER DANIELA SÁNCHEZ ACHURY **CÓDIGO:** 506957

BOGOTÁ D.C., 2020.



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE GRADO:

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CICLO DE VIDA DEL PROCESO DE TRATAMIENTO CONVENCIONAL Y PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA DE UNA INDUSTRIA TEXTIL, A PARTIR DE LA SIMULACIÓN CON LOS SOFTWARE GPS-X 7.0.1 Y GABI EDUCATION.

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL.

PRESENTADO POR:

MARÍA ALEJANDRA CÉSPEDES ARCILA **CÓDIGO:** 507071
JENNYFER DANIELA SÁNCHEZ ACHURY **CÓDIGO:** 506957

DOCENTE ASESOR:

NOMBRE: Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR.

BOGOTÁ D.C., 2020.



La presente obra está bajo una licencia:
Atribución 2.5 Colombia (CC BY 2.5)
Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by/2.5/co/>

Usted es libre de:

- Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
- hacer obras derivadas
- hacer un uso comercial de esta obra



Bajo las condiciones siguientes:



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

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C., 2020.

DEDICATORIA

*“Aunque en la mayoría de las veces,
parece que estuviéramos en una batalla,
hay momentos en los que la guerra cesa
y nos unimos para lograr nuestros objetivos”.*

*Agradecemos a Dios,
a nuestros padres y hermanos por ser guías
y benefactores de los logros propuestos,
a la empresa que nos suministró la información,
al ingeniero que promovió nuestro espíritu investigativo
y autónomo para la culminación de nuestro proyecto de grado.*

RESUMEN

El presente proyecto de investigación contextualiza la metodología para la evaluación de una planta de tratamiento de agua residual de una industria textil, donde se hace la búsqueda de información en diferentes fuentes bibliográficas y se solicita información en una empresa textil colombiana, con el fin de obtener la caracterización del agua, para poder simular las estructuras del tratamiento de esta industria por medio de diferentes programas (GPS-X 7.0.1 y GaBi).

Por consiguiente, se pretende definir un sistema adecuado para identificar la viabilidad y/o mejoramiento de la calidad del agua de los parámetros fisicoquímicos y biológicos en la salida del sistema de tratamiento a un cuerpo receptor de agua. Para obtener dicho objetivo se procesan dos hipótesis, las cuales se basan en la recopilación de los porcentajes de remoción de cada proceso y en la simulación del programa GPS-X 7.0.1, donde se realizan resultados comparativos para saber la confiabilidad en cuanto a datos teóricos o simulados, y así mismo poder ingresar los datos respectivos en el programa GaBi.

En consecuencia, se realiza un estudio del sistema convencional y se propone el reemplazo del filtro de arena por un proceso terciario de Oxidación Avanzada para realizar un análisis de ciclo de vida que identifique las variables principales que afectan directamente el medio ambiente. A su vez, establecer comparaciones del proceso convencional de la planta textil y la adición del tratamiento terciario con cuatro técnicas (ZnO, UV, H₂O₂ y O₃). Los resultados obtenidos por parte del análisis fueron mayores en cuanto a las categorías de impactos como el cambio climático, uso del suelo, eutrofización marina y eutrofización de agua dulce.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	7
2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	9
3. JUSTIFICACIÓN	12
4. ESTADO DEL ARTE	15
5. ANTECEDENTES	22
6. MARCO DE REFERENCIA	27
6.1. MARCO TEÓRICO.....	27
6.1.1. Calidad del agua	27
6.1.1.1. Parámetros físicos.....	28
6.1.1.2. Parámetros químicos	29
6.1.1.3. Parámetros biológicos.....	32
6.1.2. Uso y manejo del agua y químicos en la industria textil	32
6.1.3. Contaminación del agua en industria textil	35
6.1.4. Colorantes	36
6.1.5. Tratamiento de aguas residuales	36
6.1.6. Procesos de oxidación avanzada (AOP)	39
6.1.7. Síntesis de Nanopartículas de ZnO.....	43
6.1.8. Análisis de ciclo de vida	45
6.1.8.1. Etapas del ciclo de vida.....	47
6.1.9. Herramienta informática utilizada	51
6.2. MARCO CONCEPTUAL	47
6.3. MARCO LEGAL	48
7. OBJETIVOS	50
7.1. OBJETIVO GENERAL	50
7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	50
8. METODOLOGÍA	51
8.1. ESQUEMA METODOLÓGICO.....	51
8.2. BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN.....	52
8.3. INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR la empresa	52
8.3.1. Estudio de agua residual en la empresa	54

8.3.2.	Uso de la información suministrada	58
8.3.3.	Cálculos de balance de masa y energía	60
8.3.3.1.	Cálculo balance de masa	60
8.3.3.2.	Cálculo de balance de energía.....	62
8.4.	OBJETIVO Y ALCANCE DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	63
8.4.1.	Unidad funcional.....	63
8.4.2.	Límites sistema	64
8.4.3.	Categorías de impacto	65
8.4.4.	Modificación con el Proceso de Oxidación Avanzada	67
9.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	68
9.1.	CÁLCULO DE BALANCE DE MASA.....	68
9.2.	COMPARATIVO DE LOS DATOS SUMISTRADOS POR LA EMPRESA CON LAS DOS HIPOTESIS PLANTEADAS.....	79
9.3.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	88
9.3.1.	Flujo influente (m ³ /h)	88
9.3.2.	Superficie de un tren (m ²).....	90
9.3.3.	Profundidad del lecho del filtro (m)	91
9.3.4.	Superficie del lecho del filtro (m ²)	93
9.3.5.	Superficie específica de los lechos filtrantes ((1/m) x10 ³)	94
9.3.6.	Fracción de captura de sólidos ((concentración base) (-))	96
9.4.	CÁLCULO DE BALANCE DE ENERGÍA.....	98
9.5.	MODIFICACIÓN DEL SISTEMA CONVENCIONAL CON EL PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA.....	124
9.5.1.	Comparación valores en la descarga del agua residual con el sistema convencional y el sistema con oxidación avanzada.....	129
9.5.2.	Porcentaje remoción	130
9.6.	ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	132
10.	EVALUACIÓN IMPACTO AMBIENTAL	134
11.	CONCLUSIONES	144
12.	REFERENCIAS.....	147

LISTA IMÁGENES

Figura 1. Escala del pH.....	30
Figura 2. Principales procesos de la cadena de producción textil.....	33
Figura 3. Principales contaminantes involucrados en algunos procesos de la industria textil del algodón.....	34
Figura 4. Funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales.	37
Figura 5. Etapas de tratamiento de agua residual.	38
Figura 6. Mecanismos de fotocátalisis heterogénea.	40
Figura 7. Equipos y proceso de la ozonización con peróxido de hidrógeno.	41
Figura 8. DAFO de los métodos de ozono.	41
Figura 9. Evolución anual de publicaciones dedicadas a la fotocátalisis con materiales alternativos al TiO_2	42
Figura 10. Etapas del ciclo de vida.	47
Figura 11. Marco de referencia de un Análisis del Ciclo de Vida, junto a las principales actividades a realizar en cada etapa.....	49
Figura 12. Análisis de Ciclo de Vida - Entradas y Salidas.	49
Figura 13. Ejemplo del método de Análisis de ciclo de vida.	50
Figura 14. Elementos de la fase de Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida.....	51
Figura 15. Mapa conceptual.....	47
Figura 16. Esquema metodológico.	51
Figura 17. Flujo del proceso en la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la compañía colombiana.....	53
Figura 18. Sistema económico circular de la empresa colombiana.	54
Figura 19. Tipos de tratamientos encontrados en la PTAR de la empresa colombiana.....	58
Figura 20. Límites del sistema.	64
Figura 21. Esquema del sistema convencional PTAR industria textil.	74
Figura 22. Descarga.	75
Figura 23. Filtro de Arena.	75
Figura 24. Filtro de carbón.....	76
Figura 25. Deshidratador.	76
Figura 26. Eliminación de lodos.	77
Figura 27. Soliquator.Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.....	77
Figura 28. Dosis de coagulante.	78
Figura 29. Tanque homogenización.....	78
Figura 30. Esquema en planta - Planta de tratamiento residual industria textil.....	98

Figura 31. Esquema del sistema convencional con el proceso de oxidación avanzada.	124
Figura 32. Descarga (POA).....	125
Figura 33. Proceso de Oxidación Avanzada.....	125
Figura 34. Filtro de carbón (POA).....	126
Figura 35. Deshidratador (POA).	126
Figura 36. Eliminación de lodos (POA).	127
Figura 37. Soliquator (POA).....	127
Figura 38. Dosis de coagulante (POA).	128
Figura 39. Tanque homogenización.....	128
Figura 40. Esquema - Planta de tratamiento convencional.....	132
Figura 41. Esquema - Planta de tratamiento con el POA.	132

LISTA TABLAS

Tabla 1. Métodos convencionales utilizados para la síntesis de nano partículas de magnetita.	24
Tabla 2. Variables y ponderación " 6 variables".....	27
Tabla 3. Calificación de la calidad del agua según los valores que tome los índices de calidad del agua.....	28
Tabla 4. Clasificación agua según el grado de dureza	31
Tabla 5. Resumen de descargas potenciales emitidas durante la fabricación de textiles.....	35
Tabla 6. Parámetros de calidad de agua a estudiar.....	52
Tabla 7. Variables analizadas en el laboratorio (caracterización del agua en la salida del proceso de tratamiento de la empresa).....	55
Tabla 8. Comparativo de la caracterización con la Resolución 0631 de 2015, Capítulo VI, Art. 13.....	56
Tabla 9. Informe de caracterización de entrada y salida de cada proceso, agosto de 2020.....	57
Tabla 10. Relación de datos de salida y proceso existente de la empresa.....	59
Tabla 11. Categorías de impactos ambientales.	65
Tabla 12. Componentes en la Salida del proceso de ablandamiento.	68
Tabla 13. Cálculos para la alcalinidad.	69
Tabla 14. Consumo de alcalinidad en las reacciones de coagulación.	69
Tabla 15. Resultado de balance de la entrada y salida del proceso de ablandamiento (suavizadores).	70
Tabla 16. Resultado de balance de la entrada y salida del proceso del filtro de carbón.....	71
Tabla 17. Resultado de balance de la entrada y salida del proceso del deshidratador.	71
Tabla 18. Resultado de balance de la entrada y salida del proceso del filtro de arena.	72
Tabla 19. Resultado de balance de entrada y salida del proceso soliquator.	72
Tabla 20. Porcentajes de remoción para el proceso de Soliquator.....	73
Tabla 21. Resultado final de los componentes en la entrada del sistema.....	74
Tabla 22. Resultados de la descarga en GPS-X.....	75
Tabla 23. Resultados del Filtro de Arena en GPS-X.....	75
Tabla 24. Resultados del Filtro de carbón en GPS-X.	76
Tabla 25. Resultados del deshidratador en GPS-X.	76
Tabla 26. Resultados de la eliminación de lodos.....	77

Tabla 27. Resultados del Soliquator del sistema en GPS-X	77
Tabla 28. Resultados de la dosis de coagulante.....	78
Tabla 29. Resultados del tanque de homogenización.	78
Tabla 30. Cálculo volumen tanque homogenización.....	99
Tabla 31. Dimensiones tanque homogenización	100
Tabla 32. Valores de gradiente hidráulico y tiempo de mezcla de acuerdo a tipo de agitación.....	100
Tabla 33. Datos de entrada tomados para el diseño de coagulación.	101
Tabla 34. Volumen reactor- mezcla rápida.	101
Tabla 35. Valor de la potencia requerida para la mezcla rápida.	102
Tabla 36. Dimensión reactor - mezcla rápida.....	103
Tabla 37. Datos de entrada floculador - eje vertical.....	103
Tabla 38. Volumen reactor - mezcla lenta.....	104
Tabla 39. Dimensiones reactor -mezcla lenta.....	104
Tabla 40. Potencia requerida - mezcla lenta.....	105
Tabla 41. Diseño sedimentador de alta tasa.....	106
Tabla 42. Registro valores, comprobación diseño.	108
Tabla 43. Datos de entrada filtro carbón.	109
Tabla 44. Diseño filtro carbón.	110
Tabla 45. Valores considerados para la altura total filtro carbón.	110
Tabla 46. Caudal y volumen de lavado filtro carbón.	111
Tabla 47. Volumen de filtración y porcentaje de lavado.....	111
Tabla 48. Valores considerados para la altura total filtro arena.	112
Tabla 49. Cálculo volumen suavizadores.....	112
Tabla 50. Dimensiones - suavizador.....	113
Tabla 51. Altura estática bomba-hidrotamiz.....	113
Tabla 52. Cálculos hidráulicos Bomba inicial - Tanque homogenización.....	115
Tabla 53. Inventario accesorios tramo Bomba inicial - Tanque homogenización.....	116
Tabla 54. Altura dinámica a superar tramo Bomba inicial - Tanque homogenización.	116
Tabla 55. Cálculos hidráulicos Tanque homogenización-Soliquator.....	116
Tabla 56. Inventario accesorios tramo Tanque homogenización - Soliquator.....	116
Tabla 57. Altura dinámica a superar tramo Tanque homogenización -Soliquator.	117
Tabla 58. Cálculos hidráulicos Tanque Soliquator -Filtro carbón.....	117
Tabla 59. Inventario de accesorios tramo Soliquator- Filtro carbón.....	117
Tabla 60. Altura dinámica a superar tramo Soliquator -Filtro carbón.....	118
Tabla 61. Cálculos hidráulicos Tanque Soliquator - Filtro carbón.....	118
Tabla 62. Inventario de accesorios tramo Soliquator- Filtro carbón.....	118

Tabla 63. Altura dinámica a superar tramo Soliquator -Filtro carbón.....	118
Tabla 64. Cálculos hidráulicos Filtro carbón - Filtro arena.....	119
Tabla 65. Inventario accesorios tramo Filtro carbón - Filtro arena.....	119
Tabla 66. Altura dinámica a superar tramo Filtro carbón - Filtro arena.....	119
Tabla 67. Cálculos hidráulicos Filtro carbón - Filtro arena.....	120
Tabla 68. Inventario accesorios tramo Filtro carbón - Filtro arena.....	120
Tabla 69. Altura dinámica total a superar tramo Filtro carbón - Filtro arena.....	120
Tabla 70. Valores para el cálculo potencia mecánica teórica.....	121
Tabla 71. Datos necesarios para buscar bomba con fabricante.....	122
Tabla 72. Energía requerida planta tratamiento agua residual textil.....	123
Tabla 73. Resultados de la descarga en GPS-X (POA).....	125
Tabla 74. Resultados del Proceso de Oxidación Avanzada.....	125
Tabla 75. Resultados del Filtro de carbón en GPS-X (POA).....	126
Tabla 76. Resultados del deshidratador en GPS-X (POA).....	126
Tabla 77. Resultados de la eliminación de lodos (POA).....	127
Tabla 78. Resultados del Soliquator del sistema en GPS-X (POA).....	127
Tabla 79. Resultados de la dosis de coagulante.....	128
Tabla 80. Resultados del tanque de homogenización.....	128
Tabla 81. Comparación de datos finales en descarga de GPS-X 7.0.1.....	129
Tabla 82. Porcentajes de remoción del proceso convencional y el POA vs los valores de entrada del programa GPS-X 7.0.1.....	131
Tabla 83. Resultados de los impactos ambientales en la simulación del sistema convencional en GaBi Education.....	134
Tabla 84. Resultados de los impactos ambientales en la simulación del sistema convencional en GaBi Education (continuación).....	135
Tabla 85. Resultados de los impactos ambientales en la simulación del sistema con el POA en GaBi Education.....	135
Tabla 86. Resultados de los impactos ambientales en la simulación del sistema con el POA en GaBi Education (continuación).....	136

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Caudales en la descarga del sistema - Teoría vs GPS-X 7.0.1.....	79
Gráfica 2. Concentración de componentes - Teoría vs GPS-X 7.0.1.....	80
Gráfica 3. Entrada y salida de color real en la teoría	81
Gráfica 4. Entrada y salida de concentraciones [mg/L] de los componentes en el filtro de arena en GPS-X 7.0.1.....	82
Gráfica 5. Valores de alcalinidad en el filtro de arena en GPS-X 7.0.1.....	82
Gráfica 6. Entrada y salida de concentraciones [mgN/L] y [mgP/L] en el filtro de arena, de los componentes en GPS-X 7.0.1.....	83
Gráfica 7. Entrada, salida y retro lavado de los flujos de masa de los componentes en el filtro de arena en GPS-X 7.0.1.	83
Gráfica 8. Entrada y salida de concentraciones de los componentes en el filtro de carbón en GPS-X 7.0.1 vs Teoría.....	84
Gráfica 9. Concentración de metales en el filtro de carbón en el cálculo teórico. ...	85
Gráfica 10. Entrada y salida de concentraciones de los componentes en el Soliquator en GPS-X 7.0.1 vs Teoría.....	86
Gráfica 11. Valores DBO ₅ y DQO en la descarga del sistema - teoría vs GPS-X 7.0.1.	86
Gráfica 12. Valores de fosforo en la descarga del sistema - teoría vs GPS-X 7.0.1.	87
Gráfica 13. Parámetro DBO ₅ en flujo influente.....	88
Gráfica 14. Parámetro DQO en flujo influente.....	89
Gráfica 15. Parámetro SST en flujo influente.....	89
Gráfica 16. Parámetro DBO ₅ en flujo influente.....	90
Gráfica 17. Parámetro DQO en flujo influente.....	90
Gráfica 18. Parámetro SST en flujo influente.....	91
Gráfica 19. Parámetro DBO ₅ en la profundidad de lecho de filtro.	91
Gráfica 20. Parámetro DQO en la profundidad de lecho de filtro.....	92
Gráfica 21. Parámetro SST en la profundidad de lecho de filtro.....	92
Gráfica 22. Parámetro DBO ₅ en la superficie del lecho de filtro.....	93
Gráfica 23. Parámetro DQO en la superficie del lecho de filtro.....	93
Gráfica 24. Parámetro SST en la superficie del lecho de filtro.....	94
Gráfica 25. Parámetro DBO ₅ en la superficie especifica de los lechos filtrantes. ...	94
Gráfica 26. Parámetro DQO en la superficie especifica de los lechos filtrantes. ...	95
Gráfica 27. Parámetro SST en la superficie especifica de los lechos filtrantes.....	95
Gráfica 28. Parámetro DBO ₅ en la fracción de captura de sólidos.	96
Gráfica 29. Parámetro DQO en la fracción de captura de sólidos.	96

Gráfica 30. Parámetro SST en la fracción de captura de sólidos.....	97
Gráfica 31. Características bomba requerida para bombeo PTAR industria textil.	122
Gráfica 32. Gráfica de comparación entre la descarga en el Sistema convencional y la descarga del sistema con el Proceso de Oxidación Avanzada propuesto.	130
Gráfica 33. Resultados de los impactos totales del sistema convencional y el sistema con el POA.....	137
Gráfica 34. Impactos totales en los sistemas evaluados, en porcentajes.	138
Gráfica 35. Impacto en la categoría de eutrofización de agua dulce con el sistema convencional de tratamiento.	139
Gráfica 36. Impacto en la categoría de eutrofización marina con el sistema convencional de tratamiento.	140
Gráfica 37. Impacto en la categoría de eutrofización de agua dulce con el Proceso de Oxidación Avanzada.	141
Gráfica 38. Impacto en la categoría de eutrofización marina con el Proceso de Oxidación Avanzada.	142

1. INTRODUCCIÓN

Recurso hídrico se define como los cuerpos de agua existentes en el planeta, como océanos, ríos, lagos, arroyos y lagunas. Estos recursos deben preservarse y utilizarse de forma racional ya que son recursos no renovables e indispensables para la existencia de la vida (Pérez Porto y Merino 2013). Así mismo, el agua como fuente de vida, ayuda al desarrollo económico, social, ambiental y cultural, que contribuye al crecimiento en una región, una ciudad, un país o continente (Schuartz Pacheco Mestrinho, Fernández Cirelli y Di Risio 2005). Por lo tanto, el uso extensivo e inadecuado de las fuentes de agua, se convierte en una gran amenaza ambiental al contar con presencia de contaminantes orgánicos que son persistentes y no biodegradables durante largos periodos de tiempo, presentando riesgos importantes para la salud ambiental y humana, debido a las limitaciones en términos de efectividad, aplicabilidad y tiempo para la eliminación de contaminantes.

Una de las principales causas de la contaminación industrial, es ocasionada especialmente por la descarga de compuestos y productos químicos; ocasionando que el agua no cumpla con las características adecuadas para el ser humano, ya que no es apta para consumo o para el uso en la agricultura o actividades recreativas. Adicional a eso, pone en peligro la vida del resto de seres vivos, tanto animales como plantas (ECOCENTURY 2016). Un gran ejemplo de las industrias más importantes e indispensables para el desarrollo del país; es la industria textil, la cual requiere mayor consumo de agua y de esta manera, genera mayor cantidad de aguas residuales, con altos contenidos de contaminantes como los colorantes (Arora 2014). Por lo general, estos residuos líquidos contienen compuestos, como tintes sintéticos e innumerables compuestos tóxicos que poseen propiedades, como resistencia a la fotodegradación, lo que imposibilita a estos compuestos biodegradarse en el medio ambiente. (ECOCENTURY 2016)

La alta variabilidad de la composición y la gran intensidad de color en las aguas residuales de las instalaciones de tintura textil son difíciles de tratar satisfactoriamente. Se estima que aproximadamente el 2% de los colorantes producidos, se descargan directamente en el efluente acuoso, y el 10% se pierde posteriormente durante el proceso de coloración, por lo que es razonable suponer que, aproximadamente el 20% de los colorantes ingresan al medio ambiente a través de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales. (Arora 2014)

De esta manera, la presencia de estos contaminantes en las aguas residuales de la industria textil genera varios problemas, afectando directamente los cuerpos de agua. Así mismo, el desafío que tiene hoy en día las industrias textiles, para lograr obtener una depuración de los colorantes empleados para sus actividades, cada vez es mayor, debido a las nuevas legislaciones y controles que son cada vez más estrictos por entidades reguladoras, para que se garantice el cumplimiento de ciertas normas ambientales, con el fin de crear un país sostenible y no acabar con los recursos naturales indispensables para vivir.

Pese a todos los diferentes tratamientos básicos que se implementan en la actualidad y lo que proponen las industrias para disminuir el impacto ambiental que produce este tipo de residuos generados, no ha demostrado de forma suficiente el cuidado y el seguimiento adecuado a las normas actuales eco-amigables en el ambiente que debe tener el vertimiento del residuo de agua contaminada a ecosistemas acuáticos. De manera que, la presente propuesta, evalúa el impacto ambiental de un proceso de tratamiento de agua mediante el uso del software GaBi Education, que simula los diferentes componentes que impactan negativamente el medio ambiente en las plantas de tratamiento del sector industrial textil, con el análisis del ciclo de vida de los procesos internos de la industria. Cabe resaltar que el estudio se basa en específico de la industria textil por ser uno de los principales contaminantes a nivel global.

2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El agua definida como sustancia líquida, es la fuente de vida que compone más del 71% en el planeta (Carrion 2020). Es un recurso indispensable para la sostenibilidad, que permite un equilibrio entre lo social, económico y el medio ambiente, necesario para el sustento y desarrollo de la vida humana. El agua es empleada para actividades de agricultura, industriales y domésticas, que permiten el desarrollo y la existencia de los seres vivos. Estas actividades conllevan a una obtención de materias y recursos que, a su vez, generan gran cantidad de residuos («Los residuos que más contaminan el agua | Fundación Aquae» 2018).

A pesar de que Colombia es un país privilegiado con respecto a la disponibilidad de recursos naturales, según el índice de desempeño ambiental (EPI) no se le está dando un manejo adecuado a los mismos, entre ellos la medición de vertimientos de aguas residuales. Este fue uno de los aspectos que peores valores obtuvo el país, demostrando que la mayoría de las aguas utilizadas por la población son vertidas a los ríos sin tratamiento adecuado, lo que afecta la estabilidad del ecosistema en general. (EL TIEMPO 2014)

Cerca de un 80% de las aguas residuales del planeta se vierten al medio ambiente sin haber recibido ningún tratamiento (Bokava 2017), siendo la principal causa de enfermedades, al no tratarse el agua con su respectivo proceso y a tiempo. Es por esto, que la calidad del agua no es la más apropiada, afectando negativamente tanto la salud de las personas como el medio ambiente. Según (Valencia et al. 2019) en 2016 fallecieron en Colombia 593 personas por enfermedad diarreica aguda (EDA) relacionadas con la mala calidad del agua. Por lo que se evidencia que las fuentes de agua cuentan en su mayoría con altos índices de contaminación, debido al uso irresponsable de residuos y por el poco tratamiento que se le da, afectando directamente los recursos hídricos. Este mal manejo del tratamiento del agua se debe a las carencias de infraestructuras, educación y financiamiento para reducir los daños irremediables que se está provocando en los ecosistemas y en la salud humana.

Actualmente, Colombia presenta grandes porcentajes de contaminación debido a una inadecuada recolección y tratamiento de aguas residuales generadas por las industrias y de uso doméstico. La contaminación que se está viviendo hoy en día es puntual y a gran escala, de acuerdo a (De Vera 2018) se puede evidenciar que la industria textil es la segunda más contaminante del planeta después de la petrolera,

ya que es responsable del 20% de los tóxicos que se vierten en el agua (Sánchez). Ante estos hechos se buscan alternativas para el tratamiento actual de vertimientos de aguas residuales que permita eliminar la presencia de materia orgánica provenientes de las industrias textiles, por tanto, se están implementando nuevas tecnologías que brinden soluciones sin que ocasione daño perjudicial en las poblaciones y en el medio ambiente, pero no solo se hace énfasis en la industria textil sino en general. Sin embargo, se hace pauta en esta por ser una de las principales industrias alarmantes de contaminación.

Como se mencionó anteriormente, una de las industrias con mayor consumo de agua por kilogramo de producto producido es la industria textil, donde la tecnología utilizada para teñir la fibra emplea grandes volúmenes de agua, que después de utilizarse tienen que descartarse por su coloración, y también cuentan con una alta Demanda Química de Oxígeno (DQO) y alto contenido de Sólidos Totales (ST), entre otras características. Estos factores hacen de esta industria un área de oportunidad para implementar diferentes tecnologías en el tratamiento de sus aguas residuales, con el objetivo de controlar la carga contaminante en las descargas y recuperar el agua con la finalidad de reutilizarse dentro del mismo proceso. (Rodríguez Cisneros 2005)

Finalmente, hasta el día de hoy no se ha logrado tener una valoración real de la cuantificación de impacto ambiental generado por las industrias. Si bien se sabe que hay procesos de tratamiento para eliminar estos compuestos contaminantes generados, mas no se evalúa el impacto que estas tecnologías o procesos tienen. Por lo tanto se propone realizar un análisis de ciclo de vida en cada una de las etapas de entrada y salida del sistema interno de tratamiento, el cual permite cuantificar la contaminación de cada proceso en evaluación que se emplea en las industrias en Colombia, a partir de datos obtenidos de fuentes primarias; esto con el fin de poder establecer diferentes indicadores que arrojen los índices de contaminación en cuanto a la calidad del agua vertida a los cuerpos hídricos después de un tratamiento.

A su vez proponer la incorporación de tecnologías limpias, en este caso, un tratamiento de oxidación avanzada que se adecúe a la caracterización del agua, donde se identifique y se evalúen las cargas ambientales asociadas al ciclo de vida del proceso productivo de cada planta de tratamiento. Así mismo, se deben adoptar cambios en las tecnologías de producción (maquinaria y/o procesos), selección de materia prima y su tratamiento interno con los residuos generados para reducir estos

desechos, y con esto lograr que los impactos negativos ambientales sean mínimos y reducir los daños al ecosistema, tema que nos corresponde de forma colectiva.

Por lo tanto, la presente propuesta de investigación plantea ***¿Cuál es el impacto ambiental generado por un sistema de tratamiento convencional del agua residual textil respecto al forjado por un sistema de oxidación avanzada fotocatalítico?***

3. JUSTIFICACIÓN

La gran cantidad de desechos producidos por las industrias textiles están impactando negativamente los ecosistemas acuáticos y la calidad de vida humana. La principal fuente de contaminación se debe a las aguas residuales y sustancias químicas que éstas generan. Respecto a (SB Global 2019) las sustancias químicas prioritarias a eliminar de la industria textil antes de 2020 son: alquifenoles, por ser persistentes, bioacumulables y tóxicas; colorantes azoicos, prohibidos por liberar sustancias químicas; clorobenzenos, relacionados con afecciones al hígado y tiroides. Estos resultados son evidentes debido a la gran cantidad de agua que demanda la industria textil por lo que es necesario recalcar que, se vierten sus residuos a las diferentes fuentes hídricas sin un adecuado tratamiento, siendo un riesgo para la calidad de los recursos hídricos que cada vez son más escasos.

Para mitigar el impacto ambiental que se produce por la falta de infraestructura para tratar estos vertimientos, es necesario incentivar el tratamiento de aguas residuales mediante la reutilización de este recurso. De acuerdo con la (ONU 2019) en la industria textil, confeccionar unos jeans requiere 7.500 litros de agua, el equivalente a la cantidad de líquido vital que bebe una persona promedio en siete años; por lo que es necesario, buscar alternativas para el reúso de agua contaminada, ya que, al reutilizar, permite que las industrias textiles logren ser auto-sostenibles y logren mejorar la eficiencia en el uso del agua, reduciendo el impacto ambiental.

Un ejemplo claro es la empresa Lafayette, que consideran que el agua es el principal recurso para la vida humana y, por ende, tienen diferentes programas y recursos destinados al tratamiento de sus residuos, reciclando 60% de agua para procesos de la fábrica y disminución de consumo del agua en litros/metro de tela. Del mismo modo, la mayoría de las empresas se encargan del cuidado y el manejo de estos residuos, pero según (De Vera 2018), fabricar ropa no es el único factor que incide en la presión al medio ambiente, mantenerla también. En un estudio de la Universidad de Plymouth (Reino Unido), descubrieron que la ropa de poliéster y acrílico, arrojaba miles de fibras plásticas tóxicas con cada lavada, enviando otra fuente de contaminación plástica por el desagüe y, finalmente, hacia el océano. Según este trabajo, una persona podría liberar casi 300 millones de microfibras de poliéster por año al medio ambiente lavando su ropa y más de 900 millones al aire simplemente usando las prendas.(De Falco et al. 2020)

A pesar de que se tengan en cuenta varias medidas de mitigación para reducir el impacto de estos vertimientos, infortunadamente, el funcionamiento que tiene una

planta de tratamiento residual convencional no es la más adecuada. (Alonso et al. 2018) Se considera que: los tratamientos de aguas residuales textiles convencionales (en un tratamiento primario) involucran la coagulación química con sales de hierro o aluminio combinada con procesos biológicos o adsorción, pero este proceso solo es eficiente para remoción de coloides y sólidos suspendidos. Cabe mencionar que, los compuestos de agua residual de la industria textil tienen estructuras aromáticas complejas y detergentes con alta solubilidad en agua, resistentes a la degradación mediante procesos biológicos (tratamientos secundarios). Esto implica que los métodos convencionales son insuficientes y se requiere buscar alternativas competentes que permita destruir compuestos tóxicos y peligrosos, los cuales son persistentes a la degradación natural para el tratamiento de este tipo de aguas residuales.

En reflejo a lo anterior, se hace el estudio y la propuesta de un reactor de oxidación avanzada como tratamiento terciario adicional. Esta aplicación de tecnologías de purificación tiene en cuenta la naturaleza y las propiedades fisicoquímicas de las aguas a tratar, entrando al tema de los Procesos Avanzados de Oxidación (TAOs, PAOs), el cual se encarga de la remediación y desintoxicación de aguas problema (Domènech, Jardim y Litter 2001). Estos procesos son capaces de producir cambios y transformar químicamente el agua residual y, además, poseen alta efectividad para la oxidación de materia orgánica.

La investigación cuenta con información, y a su vez, evalúa el impacto ambiental de la simulación en un software proponiendo un proceso adicional de fotocatalisis heterogénea, el cual se basa en la generación de especies químicas altamente oxidantes, principalmente el radical hidroxilo (OH^\cdot) producido por la descomposición del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en presencia de óxido de zinc (ZnO) como catalizador. Con respecto a (Miklos et al. 2018) se dice que estos métodos de oxidación avanzada, en los cuales se involucran la ozonización e irradiación UV, permiten un buen funcionamiento a gran escala en instalaciones tanto en tratamientos de agua potable, como en agua residual.

La ozonización y la fotocatalisis se utilizan para eliminar selectivamente los colorantes de los efluentes en las industrias que tienen residuos de colorantes (Mestres 2013). Un estudio afirma (M'Arimi et al. 2020) que: "Una combinación de radiación UV con una longitud de onda inferior a 280 nm da como resultado la formación rápida de radicales de hidroxilo OH^\cdot " (Wang et al. 2017). En particular, los radicales hidroxilos (OH^\cdot) generados por estos métodos, tienen la capacidad de oxidar contaminantes recalcitrantes y no biodegradables. (Bilińska, Gmurek y

Ledakowicz 2016). Con esto, se propone la unión de dichos procesos para el tratamiento de aguas residuales con contenidos no biodegradables en el ambiente, con el fin de identificar impactos del agua, en cuanto al vertimiento final del efluente.

Este proceso constituido por H_2O_2 / ZnO / UV / O_3 , es una tecnología prometedora para el tratamiento de agua residual debido a su capacidad para remover compuestos orgánicos con difícil degradación y así mismo cumple con los requerimientos para disminuir el impacto ambiental que el agua residual de las industrias textiles generan. Adicional a eso, evaluar el ciclo de vida mediante el software que se elige, basado en la investigación más detallada de la transformación, mejoramiento y el efecto que los componentes de alta contaminación generados en la industria textil.

4. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presentan diferentes investigaciones sobre tecnologías de oxidación avanzada con H_2O_2 / ZnO / UV / O_3 en los procesos de tratamiento de la industria textil en Colombia, una tecnología que ha sido muy poco incorporada con los 4 elementos en conjunto mencionados, como base de contextualización para el desarrollo de la presente investigación se presentan los diferentes artículos donde involucren uno o más de los elementos, a su vez se agrega información de interés para el desarrollo y comprensión del objetivo de la presente investigación:

- COMPARACIÓN ENTRE EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TEXTILES, INDUSTRIALES Y SIMULADOS POR PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (AOP): BIODEGRADABILIDAD, TOXICIDAD Y EVALUACIÓN DE COSTOS

Investigación donde se estudió el impacto de la adición de peróxido de hidrógeno para el mecanismo de la formación del radical hidroxilo en el proceso de tratamiento de aguas residuales, con una combinación de ozono y la radiación UV. En este estudio, se tuvo en cuenta la corriente de aguas residuales después del proceso de tintura reactiva industrial. Debido a su alta salinidad, alto pH y color intenso, es el tipo de aguas residuales textiles más problemático desde una perspectiva ambiental. Se indicó que, usando O_3 combinado con una concentración moderada de H_2O_2 (por debajo de 0.005 M) presenta una buena reducción de color y un aumento en la mineralización, biodegradabilidad y una reducción en la toxicidad del compuesto peligroso RB₅¹. (Bilińska, Gmurek y Ledakowicz 2016)

Dentro de los resultados encontrados en el desarrollo de esta investigación, se aplicó por primera vez el proceso UV para mezclas simuladas y aguas residuales industriales después de teñir con RB₅. Donde se consideró la reducción de color demanda química de oxígeno (DQO), y demanda biológica de oxígeno (DBO) en un 30% después de 1 hora. Además, las moléculas de los colorantes tienen una alta capacidad de absorción UV. Cuando la concentración de tinte es alta, el grado de radiación UV absorbida por este puede ser alto y afectar el proceso, como se pudo observar en el ensayo. Sin embargo, en cuanto a costos de inversión de la planta

¹ RB₅: Reactive Black 5 pertenece a la clase de colorantes azoicos textiles (vinil sulfona), utilizado en el estudio de optimización foto-catalítica en efluentes de agua. (Merck)

de ozonización son altos, en el caso de O_3/H_2O_2 son insignificantes. En contraste, el equipo de la lámpara UV aumenta significativamente los costos de inversión.

➤ **BIODEGRADACIÓN, DECOLORACIÓN Y DESINTOXICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES TEXTILES MEJORADAS POR PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADOS**

Esta investigación se centró en varios oxidantes como O_3 , H_2O_2 , y luz ultravioleta sobre la biodegradación de la solución acuosa de componentes individuales. Los resultados arrojados por la investigación en cuanto al colorante antraquinona azul ácido, este no experimentó biodegradación sin el pre-tratamiento de los AOP, por lo que se determinó un grado de eliminación implementando este proceso. Además, al implementarse la ozonización (100 mg/L) a las aguas residuales con tintes se logró una completa remoción de los colorantes, mientras que la aplicación de luz UV sola no generó una decoloración completa. Por otra parte, se puede observar que la implementación de un pre-tratamiento de AOP reduce los altos índices de toxicidad en las aguas residuales.

Los resultados de la aplicación de UV al agua residual textil durante 1–3 horas, mostraron que el tiempo de irradiación óptimo es de aproximadamente 1 hora, lo que provoca una disminución de la acción inhibitoria del crecimiento microbiano del 47 al 30%. Una adición de 2 ml de H_2O_2 , a 1 litro de solución de UV-irradiado resultó en una disminución adicional del efecto inhibitor a 26%. Por lo que un mayor tiempo de irradiación UV de las aguas residuales textiles es perjudicial para el crecimiento microbiano durante la posterior biodegradación. (Ledakowicz, Solecka y Zylla 2001)

➤ **LA DEGRADACIÓN FOTO-CATALÍTICA DEL 4-CLOROFENOL DE UNA SOLUCIÓN ACUOSA USANDO UV / ZnO / PERSULFATO DE SODIO**

Esta investigación resalta la urgencia de estudiar la presencia de aromáticos clorados como el 4-clorofenol (4CP), ya que incluso a bajas concentraciones, en las aguas residuales debe controlarse con urgencia el 4CP, debido a su alta toxicidad, potencial carcinogénico y baja biodegradabilidad (Ahmadi et al. 2018). Este estudio reveló excelentes resultados del proceso de oxidación avanzada con los contaminantes aromáticos, describiendo la efectividad del sistema en la degradación de este compuesto.

Los resultados encontrados fueron, eficiencia de degradación de 4CP mayor al 90% empleando UV/ ZnO/ Na₂S₂O₈ (persulfato de sodio), respecto a (Ahmadi et al. 2018) con condiciones experimentales de pH de 7, dosis de persulfato de sodio 11 mg/L, concentración de 4CP de 10 mg/L y dosis de ZnO de 1 g/L. Además, el radical de persulfato requiere menos energía que el radical de hidroxilo siendo una gran ventaja en costos operativos en cuanto a los procesos de AOP.

El diseño consistió en dejar cuatro lámparas UVC paralelas a 90° rodeando el reactor respectivamente a 5cm cada lámpara la cual se dejó calentar durante quince minutos y cada una con una intensidad de 5,12 mW/cm², variando las condiciones de pH entre 4,7 y 10 añadiendo una dosis de 0.25 – 2 g de litro de ZnO de las cuales se fueron tomando muestras para los arrojar los resultados obtenidos mencionados anteriormente.

➤ PREPARACIÓN DEL COMPUESTO ZnFe₂O₄ / ZnO: EFECTO DE LOS PARÁMETROS OPERATIVOS PARA LA DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE COLORANTES BAJO LUZ UV E ILUMINACIÓN VISIBLE

El presente estudio resalta la importancia de emplear métodos de oxidación avanzada incluida la fotocatalisis heterogénea la cual cuenta con numerosas ventajas, como alta eficiencia, bajo consumo de energía, aplicabilidad extendida y sin contaminación secundaria. Por lo cual, el objetivo del presente trabajo es intentar mejorar la degradación foto-catalítica de los colorantes, azul de metileno (MB) y azul de remazol brillante (RBB) tintes de uso frecuente en la industria textil bajo iluminación UV y visible, mediante la exploración de un catalizador de ferrita de zinc a base, sintetizado por el método de combustión en solución (SCM) usando sales metálicas y un combustible orgánico. (Zouhier et al. 2020)

Los resultados obtenidos fueron una remoción del 80% de las concentraciones iniciales de colorante en 2 horas mediante el compuesto de ZnO sin obtener alteración. Sin embargo, empleando Fe/ZnO la cual se logró combinando el óxido de zinc con iones de metales de transición (hierro) el cual permite que se absorban fotones de menor energía cambiando su actividad de UV a región visible, para lograr la remoción de colorantes y actividades antibacterianas. No obstante, en la práctica se evidencia que en función del tiempo de iluminación de 20 minutos era tiempo suficiente para alcanzar el 98% del porcentaje de adsorción total.

Por otra parte, los resultados obtenidos fueron bastante variables ya que se evidencio que la eficiencia de los procesos de eliminación de colorantes se puede ver afectada primero, por la concentración inicial de contaminante, pH y cantidad de catalizador donde se obtuvo un aumento en la eficiencia de eliminación fotocatalítica, mientras que en un segundo caso el aumento de la concentración inicial de colorante disminuye la eficiencia de conversión. En contraste con lo anterior, con una alta masa de catalizador, la turbidez de la solución aumenta y evita que la luz penetre y active la totalidad de la suspensión de catalizador perturbando la eficiencia de degradación del tinte.(Zouhier et al. 2020)

➤ ELIMINACIÓN DEL 1,4-DIOXANO DE LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES: RUTAS DE DESCOMPOSICIÓN EN DIFERENTES CONDICIONES OPERATIVAS PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE OXIDACIÓN DEL OZONO

Esta investigación da a conocer los parámetros operativos para obtener una viabilidad de la oxidación con ozono (O_3) en el tratamiento de agua residual industrial que contienen 1,4- dioxano y 2-metil-1,3-dioxolano (MDO), el cual mostró datos donde se puede llegar a eliminar aproximadamente el 90% de la demanda química de oxígeno y una depuración total del 1,4 dioxano y MDO en condiciones óptimas del proceso.

El 1,4-dioxano fue considerado no biodegradable por los microorganismos, aunque algunas investigaciones recientes han demostrado su biodegradación bajo ciertas condiciones; donde se obtuvieron eliminaciones apreciables a bajas concentraciones iniciales, utilizando un filtro aireado biológico de flujo ascendente; pero por diferentes bacterias depende en gran medida de la estructura de la comunidad y la presencia de una fuente de carbono adicional. La adsorción en carbón activado y la eliminación de aire no pueden eliminar el 1,4-dioxano del agua debido a su alta solubilidad y baja presión de vapor. La destilación se puede emplear, pero es costosa debido a su punto de ebullición de $101^{\circ}C$. (Barndök et al. 2014)

No obstante, entre los procesos de oxidación avanzada el ozono O_3 es particularmente prometedor para el tratamiento de materiales a escala industrial, en primer lugar, debido a su capacidad para producir altos niveles de OH^{\cdot} sin producir residuos, aunque el ozono no reacciona fuertemente con la molécula 1,4-dioxano, pero existe la probabilidad de acelerar el proceso con la combinación de ozono y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) para que interactúe con la molécula 1,-dioxano; sin

embargo, el H_2O_2 requerido puede ser costoso para altas cargas orgánicas, y en instalaciones a escala industrial por lo que generalmente solo se prefiere el uso de O_3 . (Barndök et al. 2014)

En cuanto a los resultados en el tratamiento de ozonización la influencia del pH, muestran en los experimentos de optimización realizados en solución sintética de 1,4-dioxano mostraron que existe un punto de inflexión importante para aguas residuales y se obtuvo una eliminación de DQO > 80% a pH= 9, mientras que, a un pH por debajo de 9, la eliminación de DQO disminuyó considerablemente al 60%, y solo un 20% de eliminación se logró a pH 7. Este fenómeno muestra que el OH^- producido en la ozonización a pH alto es un oxidante dominante para el 1,4-dioxano, y que la reacción del O_3 en condiciones de pH más bajas tiene una eficiencia muy baja en el tratamiento de este compuesto en particular. (Barndök et al. 2014)

En conclusión, con los resultados obtenidos se demuestra que, al trabajar con pH en condiciones básicas controladas, se pueden lograr altas eliminaciones de 1,4-dioxano y DQO con un único tratamiento, mientras que la adición de peróxido de hidrógeno mejora las velocidades de reacción para la degradación, pero también aumenta el consumo de oxidantes y el costo del tratamiento.

➤ ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

La presente investigación hace referencia inicialmente al grave problema ambiental que afecta la población y al ecosistema, por lo que se aplica la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida sobre el proceso de tratamiento de aguas residuales de la planta Talagante, Chile. Enfocado en la emisión de gases efecto invernadero (potencial de calentamiento global) una de las principales causas del cambio climático, los cuales han ido aumentando de forma progresiva. Este estudio tiene el propósito de evaluar el cambio en el uso del biogás, donde se encuentra en proceso de adquisición un motor de cogeneración donde se combustionaría el 100% del biogás, producido con el objetivo de suplir los requerimientos del biodigestor y abastecer de energía eléctrica a la planta.(Riffo Rivas 2017)

El análisis se hace con la finalidad de evaluar ambientalmente los aspectos del proceso actual y futuro de contaminación, con énfasis de la gestión energética e identificar las actividades que tienen mayor impacto y de esta manera dar diferentes opciones que ayuden a disminuir los impactos sin afectar la operación de la planta

de tratamiento. Para esta investigación se analizaron 3 escenarios el primero es el actual donde se combustiona el 40% del biogás en caldera para abastecer de energía al biodigestor y el excedente en antorcha; en el segundo, escenario el 100% del biogás es combustionando en un motor de cogeneración que produciría energía eléctrica para la planta y energía térmica para el biodigestor; el tercer escenario El tercero está basado en el segundo, y considera además la fase de ampliación de la planta en un módulo de tratamiento adicional para suplir la demanda futura. (Riffo Rivas 2017)

En cuanto a los resultados obtenidos, en el primer escenario muestra que el total de las emisiones del escenario base (año 2016) fue de 5.100 tCO₂eq. En el nuevo escenario, con cogeneración, se disminuye en un 17% las emisiones anuales de la planta. El tercer escenario se obtiene un total de 5.000 tCO₂eq para el año 2024. Las emisiones directas de la planta contribuyen sobre el 60% del total de las emisiones del sistema en todos los escenarios analizados, en donde se concluye que este tipo de análisis permite encontrar los puntos críticos en los cuales se necesita mejorar o hacer cambio al proceso productivo y con esto reducir la eficiencia energética empleada en cada proceso, tal cual se planteó en cada escenario de la presente investigación.

➤ ANÁLISIS CICLO DE VIDA DE PRODUCCIÓN NANOPARTÍCULAS ÓXIDO DE ZINC

Éste trabajo tiene como objetivo realizar un estudio de análisis de ciclo de vida de la manufactura a escala piloto de un aditivo polimérico con nanopartículas (NPs) de Óxido de Zinc (ZnO), por la empresa Servicio de Administración Peñoles, S.A (S.A.P.S.A.), con el propósito de evaluar su impacto ambiental en las categorías de daño de punto final: calidad del ecosistema, salud humana, agotamiento de recursos y cambio climático.(Alvarado Díaz 2013)

Por lo anterior se siguieron los métodos señalados por la normas NMX-SAA-14040-IMNC-2008² y NMX-SAA-14044-IMNC-2008³; las recomendaciones de la Guía General Europea para Análisis del Ciclo de Vida, además se utilizó el software para análisis de ciclo de vida GaBi versión 4.0. y la metodología de evaluación de ciclo

²Norma mexicana de gestión ambiental, etiquetas y declaraciones ambientales, declaraciones ambientales tipo III, principios y procedimiento.

³Norma mexicana de gestión ambiental, análisis del ciclo de vida, requisitos y directrices.

de vida IMPACT 2002+ versión 2.1. Los resultados obtenidos indican que las categorías de impacto más relevantes para cada una de las áreas de protección analizadas son: efectos respiratorios y no carcinogénicos (salud humana), ecotoxicidad terrestre (calidad del ecosistema), energía no renovable (recursos) y calentamiento global.

El daño a dichas categorías proviene principalmente de las entradas y salidas de materia y energía relacionadas a la extracción de la solución de Z_nSO_4 (empleada en la fase de mezclado) y del homopolímero (utilizado en la fase de masterbatch). Dentro de la extracción de la solución análisis de ciclo de vida de la producción de nanopartículas³ de Z_nSO_4 , se identificaron a los procesos de beneficio y refinación de Z_n , así como el consumo de energía eléctrica como las posibles áreas de oportunidad en la mejora del desempeño ambiental de la producción del aditivo, ya que se encuentran bajo el control operativo de S.A.P.S.A. (Alvarado Díaz 2013)

5. ANTECEDENTES

Ante la situación de las industrias con relación al agua requerida y contaminantes generados en todo el mundo, se ha forjado la búsqueda de tecnologías eficientes y amigables con el medio ambiente, que garantizan los índices de calidad del agua para su reúso y optimización después de un proceso industrial. Para tal fin, se va a estudiar y evaluar el comportamiento de los procesos de oxidación avanzada “fotocatálisis heterogénea”.

- Procesos avanzados de oxidación aplicados al tratamiento de las aguas residuales de la industria petroquímica: fenton y foto-fenton

En el trabajo de grado desarrollado en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), en la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y de Medio Ambiente (ECAPMA), programa de Ingeniería Ambiental, en la ciudad de Bogotá D.C (Cuesta B. 2019), se presenta el estudio de procesos avanzados de oxidación para el tratamiento de aguas residuales de la industria petro-química. Se indaga sobre los diferentes procesos que pueden ser aplicados a mejorar la calidad de efluentes procedentes de los procesos industriales, para mitigar los impactos ambientales sobre todo el recurso hídrico, causados por la industria petrolera. Ésta monografía analiza las características de los procesos Fenton y Foto-Fenton, identifica los parámetros que influyen en los procesos y determina la aplicabilidad de los procesos ya descritos en la remoción de contaminantes procedentes de la industria petro-química.

Para superar los inconvenientes asociados con las tecnologías de tratamiento convencionales, el método alternativo para la eliminación completa de los compuestos tóxicos ha llevado a la investigación en el campo de los "Procesos avanzados de oxidación" (AOP) como las tecnologías avanzadas de tratamiento de aguas residuales. El objetivo de estos AOP se basa en la generación de especies altamente reactivas para la degradación rápida de compuestos orgánicos inmanejables. (Khan y Pathak 2020a)

Por lo tanto, en el grupo de semillero en pro de emplear tecnologías eficientes, se ha forjado investigaciones sobre técnicas del uso de la nanotecnología y calidad del agua en la Universidad Católica de Colombia como alternativa de trabajos de grado respecto al tema, en los cuales se encuentran:

- Tratamiento de agua residual de la industria textil utilizando nano-partículas magnéticas/biomasa residual como tratamiento terciario, se realizó una investigación de métodos donde se logre emplear tecnologías de nano-partículas magnéticas y biomasa para el tratamiento de aguas residuales en las industrias textiles, revisando su funcionalidad para evaluar la calidad de agua y ver qué tipo de reuso se le puede dar a esta. Donde principalmente las nanopartículas magnéticas permiten obtener una remoción de contaminantes orgánicos e iones de metales pesados en las aguas residuales, estos tipos de materiales son emergentes los cuales plantean una gestión integral de los recursos hídricos. (Núñez Bautista y Victoria Rueda 2019)
- Implementación de nanopartículas de arcilla modificada magnéticamente para la potabilización de agua proveniente del río cuja; donde se implementa técnicas avanzadas de tratamiento “nano-arcilla”, siendo un reto para el tratamiento de potabilización del agua buscando nuevos mecanismos terciarios los cuales sean más eficientes. Esta investigación tuvo un enfoque con la nanoarcilla de lograr eliminar de forma eficiente diferentes tipos de contaminantes, como lo son bacterias, metales pesados, grasas, entre otros. Estos materiales muestran características distintivas, como potencial catalítico y alta reactividad, lo que conlleva a que haya adsorción superior a los materiales comunes. Especialmente las nanopartículas magnéticas, gracias a su composición se pueden combinar con minerales, como lo puede ser la arcilla, esta unión genera un nano-compuesto avanzado que tendría un magnetismo excepcional, estabilidad, adsorción, catálisis, y biocompatibilidad. (Moreno y Romero 2019)

Además, es importante relacionar los métodos de la obtención de nanopartículas de Zinc, para conocer los posibles métodos existentes, por ende, se identifica un ejemplo de nanopartículas de óxido de hierro, con la tesis del PhD. Bolívar (2018) en la Universidad Javeriana en Colombia, docente de la Universidad Católica de Colombia, que presenta en su trabajo, la ingeniería de nanopartículas magnéticas para la remoción de metales pesados en el agua, el cual explica los métodos de síntesis de nano-partículas de magnetita en la *Tabla 1*, dentro de las cuales muestra:

Tabla 1. Métodos convencionales utilizados para la síntesis de nano partículas de magnetita.

	<i>Descomposición Térmica</i>	<i>Hidrotermal</i>	<i>Micro-emulsiones</i>	<i>Sol-Gel</i>	<i>Mecano - química</i>	<i>Sonoquímica</i>	<i>Electroquímico</i>	<i>Coprecipitación</i>
Precursor	Acetil Acetona De Hierro	Cloruros de hierro (III y III)	Cloruros de hierro (III y III)	Sales de hierro (III y/o III)	Cloruro de hierro (III)	Cloruros de hierro (III o III)	Sales de hierro (III y III)	Sales de hierro (III y III)
Temperatura	200-320°C	220°C	40-80°C	ambiente - 40°C	Ambiente	Ambiente	Ambiente	70-85°C
Solventes	Orgánicos (Etanol)	Agua – etanol	Orgánicos	Orgánicos (etanol)	Agua	Agua	Agua	Agua
Tiempo De Reacción	Horas A Días	1 – 2 horas	3 – 24 horas	1 – 6 horas	6-12 horas	1 hora	2-24 horas	1 hora
Atmósfera De Síntesis	Inerte (Argón O Nitrógeno)	Preferiblemente inerte	Inerte (nitrógeno)	Ambiente	Inerte	Ambiente	Ambiente	Ambiente o inerte (nitrógeno)
Surfactante s/ Estabilizante	(Oleico, Trietilenglicol, Etc.)	Uso de ellos para estabilización (EG, oleico, etc.)	Uso de ellos para formar micelas	Si	No	Si	No	Uso de ellos para estabilidad (EG, oleico, etc.)
Tamaño De Partícula	4-15 nm	20-80 nm	10 nm	20-200 nm	15-50 nm	15-30 nm	10-50 nm	20-40 nm
Distribución de Tamaño	Muy Estrecha	Amplia	Estrecha	Estrecha	Amplia	Media	Amplia	Amplia
Estabilidad	Estables Por Surfactantes (Z Potencial +40)	Dependiendo del uso de estabilizantes antes	Estables	Estables	No	Estables	Baja	Baja
Características Magnéticas	Aprox. 80 Emu/g	40-50 emu/g	25-70 emu/g	30-60 emu/g	40-70 emu/g	40-70 emu/g	20-45 emu/g	60-85 emu/g

Continuación de tabla 1. Métodos convencionales utilizados para la síntesis de nano partículas de magnetita.

	<i>Descomp o-sición Térmica</i>	<i>Hidroter mal</i>	<i>Micro- emuls iones</i>	<i>Sol-Gel</i>	<i>Mecano - química</i>	<i>Sonoquí- mica</i>	<i>Electr oquím ico</i>	<i>Coprecipi -tación</i>
<i>Cristalini dad</i>	Muy Buena	Muy buena	Baja calida d de cristali nidad	Buena	Baja	Buena	Baja	Buena
<i>Factibilid ad Escalado</i>	Media	Alta	Baja	Baja	Alta	Media	Baja	Alta
<i>Principal Aplicació n</i>	Hipertermi a	Adsorció n de contami nantes	Hipert ermia	Hipertermi a	Variada	Variada	Variada	Variada

Fuente: PhD. BOLIVAR, W.M., 2018. INGENIERÍA DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS. Pontificia Universidad Javeriana [en línea], no. 1, pp. 43. [Consulta: 26 marzo 2020]. ISSN 1098-6596. DOI 10.1017/CBO9781107415324.004.

Posteriormente, este tipo de investigación de oxidación avanzada no se ha realizado aún en la Universidad Católica de Colombia, por lo que se referencian tesis de otras universidades que ayuden al desarrollo y aplicación de la fotocatalisis heterogénea:

- En el año 2018, en la Universidad de Cantabria, la Ingeniera Deva Pelayo Torices, como proyecto de grado realizó la investigación y análisis de los últimos avances en los AOPs y sus tendencias futuras, así como las mejoras a realizar en futuras investigaciones para conseguir implementar estas tecnologías a mayor escala y conseguir importantes avances en la descontaminación de las aguas y, por tanto, en la sostenibilidad del ambiente; todo esto ofreciendo un enfoque global para poder comparar y comprender los campos más factibles en los que seguir investigando (Torices 2018). En esta investigación para los procesos de ozono en la generación de radical hidroxilo es relativamente lenta, pero añadiendo H₂O₂ y realizado el proceso con UV o con ambos juntos, se mejora este inconveniente. También se consigue solventarlo añadiendo catalizadores y, para UV la nueva tendencia es la utilización de diferentes fuentes de radiación, como son los dispositivos LED.

- En el año 2014, en la Universidad Autónoma de Nuevo León, el Ingeniero Rubén Ahumada Lazo, como trabajo de grado para su maestría, realizó un estudio sobre el uso del ZnO en forma de películas depositadas por la técnica de “sputtering” y evaluar su actividad foto-catalítica en la eliminación del colorante orange G en fase acuosa. Y además establecer las relaciones existentes entre las características fisicoquímicas y el desempeño foto-catalítico de las películas de ZnO. Las películas son altamente porosas y con una alta área superficial, lo que puede favorecer la mayor adsorción de los contaminantes y jugar un rol importante en mejorar la actividad foto-catalítica. Los contaminantes degradados fueron: fenol, clorofenol, naftaleno y antraceno. (Ahumada-Lazo 2014)

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1. MARCO TEÓRICO

6.1.1. Calidad del agua

La calidad del agua de un recurso hídrico depende del uso que se le quiera dar y ésta, a su vez, está determinada por los diferentes parámetros que caracterizan su calidad. Los parámetros de calidad varían en importancia dependiendo el tipo de uso. (Sierra Ramírez 2013)

- Índices de calidad del agua: Es la valoración de la calidad del agua puede ser entendida como la evaluación de su naturaleza química, física y biológica en relación con la calidad natural, los efectos humanos y usos posibles, existen índices de calidad de agua (ICA) e índices de contaminación (ICO). La principal diferencia entre unos y otros está en la forma de evaluar los procesos de contaminación y el número de variables tenidas en cuenta en la formulación del índice respectivo. (Torres et al. 2008)

Según (Orjuela Orjuela 2013) el índice de calidad del agua es el valor numérico que califica en una de cinco categorías la calidad del agua de una corriente superficial, con base en las mediciones obtenidas para un conjunto de cinco o seis variables, registradas en una estación de monitoreo j en el tiempo t. En la Tabla 2 se resumen las variables involucradas en el cálculo del indicador.

Fuente: ORJUELA ORJUELA, L.C., 2013. Hoja metodológica del indicador Demanda Bioquímica de Tabla 2. Variables y ponderación " 6 variables".

Oxígeno en las masas de agua por estación (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de

VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	PONDERACIÓN
Oxígeno disuelto (OD)	% Saturación	0,17
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	0,17
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	0,17
Nitrógeno total (NT)/ fosforo total (PT)	-	0,17
Conductividad eléctrica (CE)	µS/cm	0,17
pH	Unidades de pH	0,15

Colombia. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. . [en línea]. S.l.: [Consulta: 18 marzo 2020]. Disponible en: www.ideam.gov.co.

Tabla 3. Calificación de la calidad del agua según los valores que tome los índices de calidad del agua.

Categorías de valores que puede tomar el indicador	Calificación de la calidad del agua	Señal de alerta
0.00 - 0.25	Muy mala	Rojo
0.26 - 0.50	Mala	Naranja
0.51 - 0.70	Regular	Amarillo
0.71 - 0.90	Aceptable	Verde
0.91 - 1.00	Buena	Azul

Fuente: ORJUELA ORJUELA, L.C., 2013. Hoja metodológica del indicador Demanda Bioquímica de Oxígeno en las masas de agua por estación (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. . [en línea]. S.l.: [Consulta: 18 marzo 2020]. Disponible en: www.ideam.gov.co.

6.1.1.1. Parámetros físicos

Se consideran parámetros físicos porque son perceptibles por los sentidos (vista, olfato o gusto), y tienen incidencia directa sobre las condiciones estéticas y de aceptabilidad del agua (Pradillo).

- **Turbidez:** Hace referencia a la medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión; mide la claridad del agua. Es la medida de cuántos sólidos (arena, arcilla, limos, coloides) hay en suspensión en el agua. (Toro 2011)
- **Color:** El agua pura no es incolora, tiene un tinte azul verdoso en grandes volúmenes. El color afecta estéticamente a la potabilidad de las aguas y afecta como colorante de ciertos productos cuando se utiliza en su fabricación. (Centro Europeo de postgrado y Universidad Rey Juan Carlos 2014).

Para identificar el color del agua para una buena calidad del agua, se pueden encontrar dos tipos de color: aparente y verdadero. El color aparente incluye el color de material disuelto más el color de la materia suspendida y, el color verdadero es el resultado de la remoción del material suspendido con un filtro o centrífuga. Este proceso usa un filtro de 0.45 micras para el análisis de color verdadero. (De Salud, De y Dirección 2015).

- Olor y sabor: Los olores y sabores en el agua están asociados con la presencia de sustancias indeseables causando el rechazo del consumidor. Los olores y sabores objetables se pueden deber a la presencia del plancton, compuestos orgánicos generados por la actividad de las bacterias y algas, a los desechos industriales o a la descomposición de la materia orgánica. Específicamente la sustancia que produce olores en la descomposición de la materia orgánica es el H₂S. No existen instrumentos para determinar los olores y sabores en el agua; generalmente estos se reportan en los análisis de aguas como presentes o no presentes. (Sierra Ramírez 2013)
- Temperatura: La temperatura es tal vez el parámetro físico más importante del agua. Además de afectar la viscosidad y la velocidad de las reacciones químicas, intervienen en el diseño de la mayoría de los procesos de tratamiento del agua (coagulación, sedimentación). (Sierra Ramírez 2013)
- Sólidos: Para dar un diagnóstico acerca de la calidad del agua, es necesario determinar la cantidad de material sólido que contiene la muestra. (Sierra Ramírez 2013)
- Sólidos suspendidos: Consisten en limo fino, bacterias, partículas causantes de color, virus, etc., los cuales no sedimentan sino después de periodos razonables, y su efecto global se traduce en el color y la turbiedad de aguas sedimentadas sin coagulación. (Hernández 2007)
- Sólidos disueltos: Consiste en la materia orgánica e inorgánica, son invisibles por separado, no son sedimentables y globalmente causan diferentes problemas de olor, sabor, color y salud, a menos que sean precipitados y removidos mediante métodos físicos y químicos. (Hernández 2007)

6.1.1.2. Parámetros químicos

- Alcalinidad: La alcalinidad del agua es su capacidad de neutralizar ácidos, y es la suma de todas las bases titulables; el valor medido puede variar significativamente con el pH de punto final empleado. La alcalinidad es una medida de una propiedad agregada del agua y se puede interpretar en términos de sustancias específicas sólo cuando se conoce la composición química de la muestra. (Bojaca 2005)

En las aguas naturales la alcalinidad se debe a la presencia de iones CO_3^{2-} y HCO_3^- los cuales ingresan al agua debido a la acción del CO_2 sobre los materiales naturales del suelo. (Sierra Ramírez 2013)



Dónde; CaCO_3 : *Componente natural del suelo*
 $\text{Ca} [\text{HCO}_3^-]_2$: *Alcalinidad al bicarbonato*
 CaCO_2 : *Alcalinidad al carbonato*

- pH: Indica la acidez o alcalinidad del agua. Las aguas muy poco mineralizadas son por lo general ligeramente ácidas, el resto son alcalinas fundamentalmente por los bicarbonatos que tiene disueltos el agua. (EMASA 2020)

Por análisis químicos se sabe que el pH siempre se encuentra en una escala de 0 a 14. La escala de pH se describe en la Figura 1. Escala del pH.

Figura 1. Escala del pH.



Fuente: SIERRA RAMÍREZ, C.A., 2013. Calidad del Agua. Evaluación y diagnóstico. S.l.: s.n. ISBN 9788578110796.

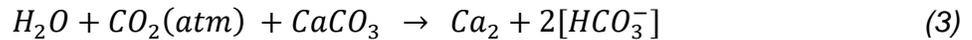
- Conductividad: La conductividad es un indicativo de las sales disueltas en el agua y mide la cantidad de iones especialmente de Ca, Mg, Na, P, bicarbonatos, cloruros y sulfatos. Se mide en micromhos/cm o Siemens/cm. La conductividad es una medida indirecta de los sólidos disueltos (Sierra Ramírez 2013). De acuerdo con la experiencia se pueden correlacionar con la siguiente expresión:

$$\text{Sólidos totales disueltos}(\text{mg/L}) = 0,55 \text{ a } 0,7 * \text{conductividad}(\mu\text{mhos/cm}) \quad (2)$$

- Dureza: Mide la concentración en Calcio y Magnesio que tiene el agua. Incide claramente en el "sabor" del agua. Cantidades superiores a 200-250 mg/L,

coincidiendo con el pH elevado, suele producir incrustaciones en tuberías y electrodomésticos. (EMASA 2020)

La dureza la ocasiona la presencia de cualquier catión bivalente en el agua, principalmente Ca^{2+} y Mg^{2+} . La dureza ingresa al agua en el proceso natural de disolución de las formaciones rocosas presentes en el suelo.(Sierra Ramírez 2013)



Dónde: $CaCO_3$: Carbonato componente natural del suelo.
 $2[HCO_3^-]$: Alcalinidad del bicarbonato.

Tabla 4. Clasificación agua según el grado de dureza

Blandas	0	75 mg/L de $CaCO_3$
Moderadamente duras	75	150
Duras	150	300
Muy duras	300	o más

Fuente: SIERRA RAMÍREZ, C.A., 2013. Calidad del Agua. Evaluación y diagnóstico. S.l.: s.n. ISBN 9788578110796.

- Oxígeno disuelto: Este parámetro hace referencia a la cantidad disuelta de oxígeno en el agua. las aguas superficiales limpias suelen estar saturadas de oxígeno, lo que es fundamental para la vida. Si el nivel de oxígeno disuelto es bajo indica contaminación con materia orgánica, mala calidad del agua e incapacidad para mantener determinadas formas de vida.(Ocasio 2008)
- Demanda biológica de oxígeno: Indica la cantidad en miligramos de oxígeno disuelto que utilizan las bacterias para descomponer la materia orgánica presente en un litro de agua. Es una medida cuantitativa de la contaminación del agua por materia orgánica.(Ecofluidos Ingenieros S.A.)
- Demanda química de oxígeno: Determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo. (Rodríguez M. 2007)

6.1.1.3. Parámetros biológicos

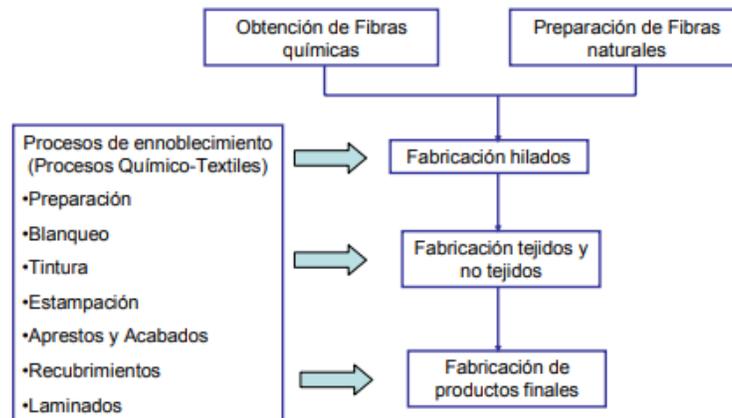
Las aguas poseen en su constitución una gran variedad de elementos biológicos, desde microorganismos hasta peces. El origen de los microorganismos puede ser natural, provenir de contaminación por vertidos industriales o por arrastre de los existentes en el suelo por acción de la lluvia. La cantidad de microorganismos va acompañando las características físicas y químicas del agua, ya que cuando el agua tiene temperaturas templadas y materia orgánica disponible, la población crece y se diversifica.(Pradillo)

- Bacterias coliformes: Indicador general de contaminación bacteriana. En ausencia de *Escherichia coli* (indicador de contaminación fecal), esta contaminación puede provenir de una desinfección deficiente en el tratamiento o bajo nivel de Cloro en la red de distribución. (EMASA 2020)

6.1.2. Uso y manejo del agua y químicos en la industria textil

En cada una de las etapas de transformación de la tela, las materias primas se ven sometidas a una serie de tratamientos en los que intervienen productos químicos; el medio de aplicación de estos últimos a las materias textiles es el agua, en la que se disuelven o dispersan los reactivos a utilizar en cada caso. El agua es el vehículo de transporte del producto químico a la materia. Por esta razón, los procesos químico-textiles o de ennoblecimiento textil, se denominan procesos en húmedo (wet processes) y a las industrias del sector, industrias del Ramo del Agua.(Pey Clemente 2010)

Figura 2. Principales procesos de la cadena de producción textil.



Fuente: PEY CLEMENTE, J., 2010. Aplicación de procesos de oxidación avanzada para tratamiento y reutilización de efluentes textiles [en línea]. S.l.: s.n. [Consulta: 5 julio 2020]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/2241/tesisUPV2816.pdf?sequence=1>.

En la *Figura 2. Principales procesos de la cadena de producción textil.*, muestra diferentes procesos de cadena de la producción textil, donde los procesos de ennoblecimiento (Procesos Químico-Textiles) se encuentra en el primer proceso de fabricación de hilados, la preparación de la tela, blanqueo y tintura hace parte de la fabricación de tejidos y no tejidos, y por último, la estampación, los aprestos y acabados, recubrimientos y laminados se encuentran en fabricaciones finales.

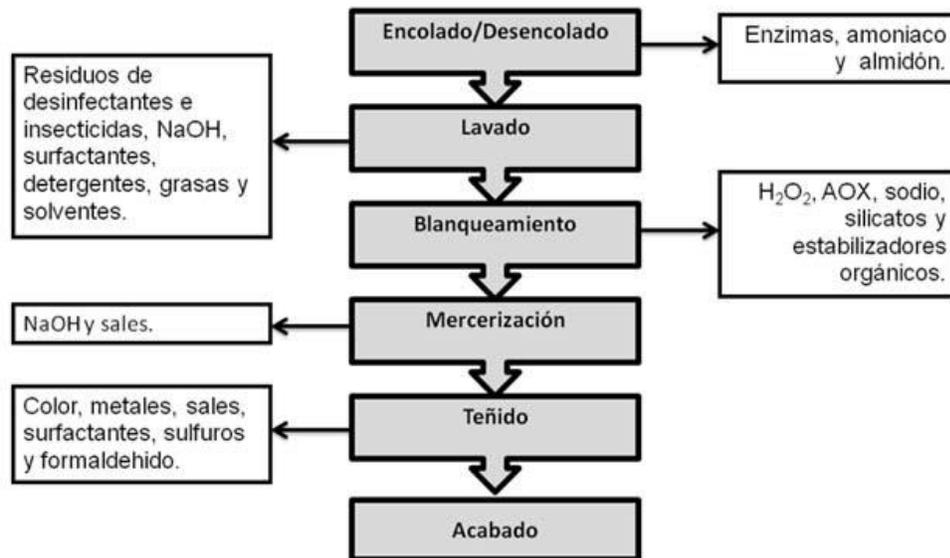
La industria textil es caracterizada por el uso de grandes cantidades de químicos y enormes volúmenes de agua como; detergentes y sosa cáustica⁴ usados para remover suciedad, polvo, aceites y ceras, blanqueadores empleados para mejorar la blancura y brillo, almidones y otros espesantes que son añadidos para mejorar el manejo de la tela, derivados de aceites y otros lubricantes que tienen como función optimizar la confección con agujas y el giro de la tela en máquinas, látex y gomas que son usados como fijadores, colorantes, agentes fijadores y otros inorgánicos que tienen la función de proporcionar los tonos y colores que demande el mercado y otros muchos reactivos químicos específicos se utilizan como agentes suavizantes, secuestrantes, antiespumantes, penetrantes y humectantes. (Rodríguez Cisneros 2005)

Muchos de estos químicos forman parte del producto final y tienen una función específica en el proceso, sin embargo, buena parte de éstos son removidos del

⁴La sosa cáustica es uno de los nombres comunes que se le da al Hidróxido de Sodio, también conocido como hidróxido sódico, sosa lejía y jabón de piedra. («Sosa Caustica: Usos y Aplicaciones - Sosa Caustica»)

producto en las descargas de agua al término de cada una de las operaciones o en lavados posteriores. (Rodríguez Cisneros 2005)

Figura 3. Principales contaminantes involucrados en algunos procesos de la industria textil del algodón.



Fuente: CORTAZAR MARTÍNEZ, A., CORONEL OLIVARES, C., ESCALANTE LOZADA, A. y GONZÁLEZ RAMÍREZ, C., [sin fecha]. Contaminación generada por colorantes de la industria textil. [En línea]. [Consulta: 25 marzo 2020]. Disponible en: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/e1.html>.

En la *Figura 3. Principales contaminantes involucrados en algunos procesos de la industria textil del algodón.*, se muestra parte del proceso que se lleva a cabo en la industria textil y los contaminantes que se generan. En el proceso de teñido, se generan una gran cantidad de efluentes con colorantes ya que alrededor del 30% de estos compuestos se pierden debido a las ineficiencias del proceso de teñido y son descargados a los efluentes. El uso de una amplia variedad de colorantes químicos da origen, en periodos cortos de tiempo, a efluentes extremadamente variados en su composición, que requieren de un tratamiento de aguas muy complejo. (Cortazar Martínez et al.)

6.1.3. Contaminación del agua en industria textil

Según el tipo de proceso textil se clasifica a los contaminantes en los siguientes grupos: residuos sólidos; como borras, hilos, tejeduría y polvo en los procesos de hilado y preparación. Residuos líquidos con cargas orgánicas de DBO y tonos contaminantes (Sáenz 2018). En el blanqueo de las telas, por su parte, los contaminantes más destacados son el peróxido, blanqueadores ópticos y ácidos. En el lavado, los colorantes hidrolizados y los detergentes constituyen las principales sustancias tóxicas que se vierten en el agua durante este proceso. Finalmente, en los estampados se derraman sobre las aguas: colorantes, álcalis, humectantes y ácidos estabilizadores.(Sáenz 2018)

En otras palabras, los procesos de teñido de algodón, se encuentran cantidades significativas de colorantes en las descargas de agua. Esto es debido a que el teñido es efectuado con colorantes reactivos azo-vinil sulfónicos. Estos compuestos son sometidos a un medio alcalino durante el teñido, logrando la afinidad en los substratos textiles de algodón mediante enlaces covalentes (Rodríguez Cisneros 2005). Igualmente los colorantes presentes en el agua residual, junto con otros reactivos químicos residuales usados en el proceso e impurezas de la materia prima y otros materiales peligrosos del proceso de acabado, incluyendo alcohol polivinílico, almidones, surfactantes y pesticidas, han presentado problemas significativos en el tratamiento del agua residual (Hao, Kim y Chiang 2000), La *Tabla 5* resume las descargas potenciales de agua residual en un proceso textil.

Tabla 5. Resumen de descargas potenciales emitidas durante la fabricación de textiles.

Proceso	Agua residual
Cortado de tiras	DBO, DQO, metales, agua de lavado.
Desaprestado	DBO, lubricantes, biocidas, compuestos para prevenir la estática.
Lavado	Residuos de desinfectantes e insecticidas, detergentes NaOH, aceites, grasas, pectinas, cera, lubricantes, solventes gastados.
Blanqueado	Peróxido de hidrógeno, silicato de sodio o estabilizador orgánico, pH alto
Mercerizado	Alto pH, NaOH.
Teñido	Metales, sal, surfactantes, compuestos tóxicos, compuestos orgánicos asistentes del proceso, materiales catiónicos, color, DBO, DQO, sulfuros, acidez/alcalinidad, solventes gastados.
Estampado	Sólidos suspendidos, urea, solventes, color, metales, calor, DBO, espuma.

Fuente: MENDOZA LÓPEZ, G., 2009. Decoloración de un efluente de la industria textil mediante el proceso Foto-Fenton acoplado a un sistema de bio-filtración.

6.1.4. Colorantes

Los colorantes y pigmentos son materiales altamente coloridos usados en cantidades relativamente pequeñas para impartir color a los materiales textiles con propósitos estéticos o funcionales (EPA 1996). Las moléculas de colorante contienen en su estructura uno o más grupos cromóforos (grupos de átomos con enlaces insaturados que dan color a la molécula). Entre los 12 cromóforos diferentes, los compuestos azo (fenilazobenceno) y la antraquinona son las unidades principales.(Hao, Kim y Chiang 2000)

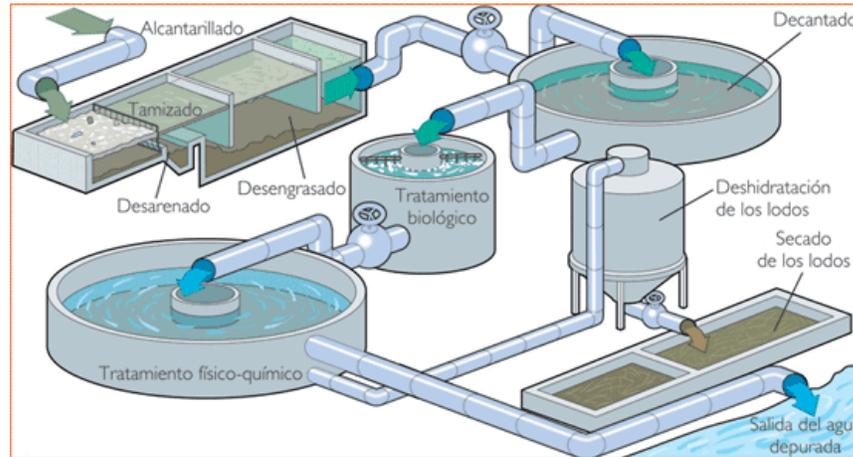
Los colorantes usados en la industria textil son en su mayor parte sintéticos y se derivan del alquitrán de carbón y de intermediarios del petróleo, sin embargo, la problemática de colorantes es que debido a los procesos típicos de teñido y estampado de 50 a 100% del color se fija a la fibra, el resto es desechado en forma de baños gastados de colorante o en el agua residual de operaciones subsecuentes de lavado.(Mendoza López 2009)

6.1.5. Tratamiento de aguas residuales

Las Plantas de Tratamiento son un conjunto de operaciones y procesos unitarios de origen físico-químico y biológico, o la combinación de ellos que están envueltos por fenómenos de transporte y manejo de fluidos. Las plantas de tratamiento de aguas residuales, tienen como objetivo preservar la salud del medio y para lograrlo es necesaria la eliminación de las bacterias patógenas que contienen las aguas negras, la estabilización de la materia orgánica presente en las aguas negras y evitar la contaminación de los cuerpos receptores favoreciendo así la flora y la fauna. (Farias 2016)

Dependiendo del uso destinado del agua, las plantas de tratamiento de agua residual se pueden clasificar en: plantas potabilizadoras; son llamadas también estaciones de tratamiento de agua potable, son las encargadas de convertir las aguas residuales aptas para el consumo humano. En las industrias grandes, por lo general, se instalan 2 unidades, las depuradoras de aguas residuales industriales (EDAR); son las más comunes entre los tipos de plantas de tratamiento de aguas residuales, donde el agua es reutilizada para los mismos procesos de las industrias, no siendo esta apta para el consumo humano, y las plantas desaladoras; absorben el agua salada que proviene del mar y la procesan para usos industriales y agrícolas. Las industrias ubicadas a orillas del mar son las que usan este tipo de planta.

Figura 4. Funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales.



Fuente: Plantas de tratamiento de aguas residuales. [en línea], [sin fecha]. [Consulta: 20 marzo 2020]. Disponible en: <https://tratamientodeaguasresiduales.net/plantas/>.

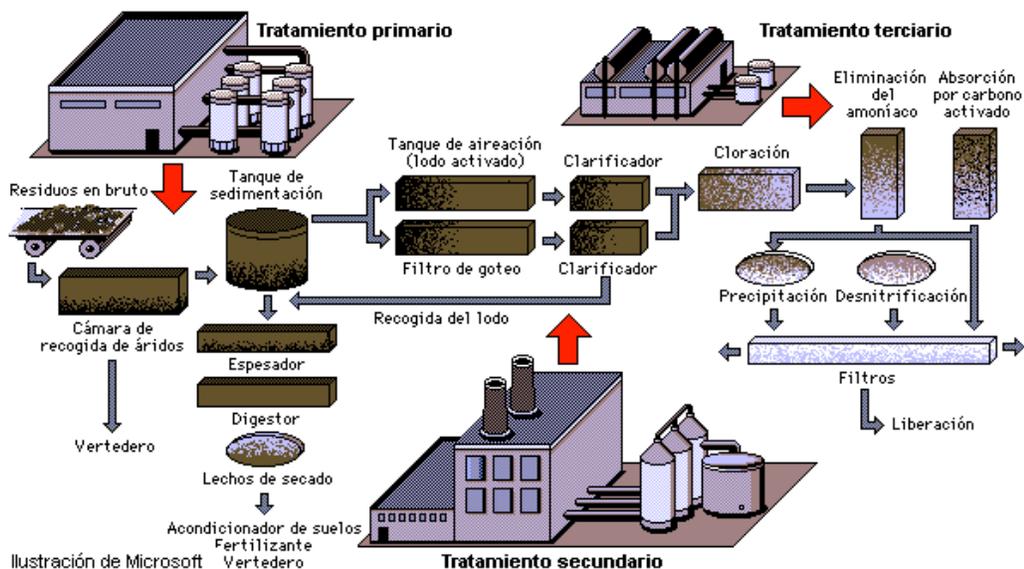
Respecto a *Figura 4. Funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales*, el funcionamiento de una planta de agua residual empieza por el sistema de alcantarillado, ya sea doméstico o industrial. El cual desemboca en un desarenador, tamizado y desengrasado, posteriormente pasa al proceso decantado, el tratamiento biológico y el tratamiento fisicoquímico en el cual se clasifican los lodos y la depuración del agua que ingresó inicialmente al sistema, implementado su respectivo tratamiento para fines de reutilización.

Este tipo de planta de tratamiento está comúnmente compuesto por cuatro fases: Pre-tratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario.

- Pre-tratamiento: Este proceso cumple las funciones de regular y medir el caudal de agua que ingresa a la planta. Además, en este tratamiento se remueven los sólidos flotantes de gran tamaño, la arena y la grasa presentes en las aguas negras. («Etapas del tratamiento de aguas residuales»)
- Tratamiento primario: El objetivo de este tratamiento es la eliminación de los sólidos en suspensión. Este se realiza por medio de un proceso de sedimentación simple por gravedad o asistida por sustancias químicas. El agua residual es depositada en grandes estanques decantadores y queda retenida allí de 1 a 2 horas. («Etapas del tratamiento de aguas residuales»)

- Tratamiento secundario: Los objetivos principales de esta etapa es eliminar la materia orgánica en estado coloidal y en disolución a través de un proceso de oxidación de naturaleza biológica. También, la degradación de sustancias del contenido biológico presente en el agua residual causado por desechos humanos.(«Etapas del tratamiento de aguas residuales»)
- Tratamiento terciario: Esta es la etapa final del tratamiento de aguas residuales. En ella se realizan una serie de procesos, entre ellos la eliminación de agentes patógenos como bacterias fecales y de los nutrientes. Estos procesos aumentan a estándares requeridos la calidad del agua para ser descargada en mares, ríos, lagos y demás cuencas hidrográficas. («Etapas del tratamiento de aguas residuales»)

Figura 5. Etapas de tratamiento de agua residual.



Fuente: AHMADI, M., SAMARBAF, S., GOLSHAN, M., JORFI, S. y RAMAVANDI, B., 2018. Data on photo-catalytic degradation of 4- chlorophenol from aqueous solution using UV/ZnO/persulfate. Data in Brief, vol. 20, pp. 582-586. ISSN 23523409. DOI 10.1016/j.dib.2018.08.076.

Debido a la complejidad y variabilidad de efluentes textiles se debe implementar sistemas sofisticados para resolver problemas causados por los contaminantes como lo son: el proceso de coagulación/floculación/sedimentación; los cuales consisten en el uso de reactivos químicos para desestabilizar y aumentar el tamaño de las partículas y hacer que se agreguen en flóculos mediante agitación, y una separación física de los sólidos de la fase líquida por sedimentación (decantación)

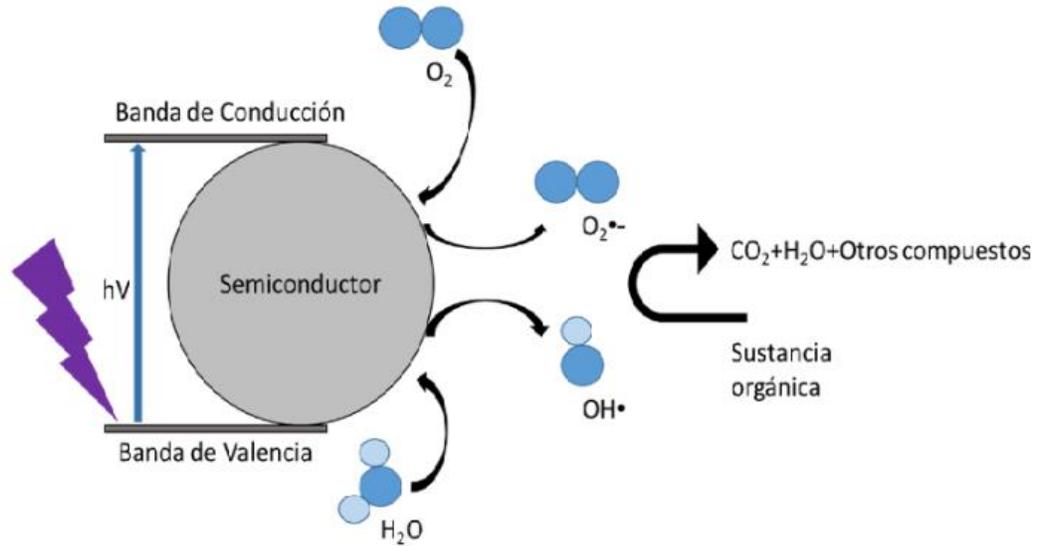
(Mazille y Spuhler), procesos de membrana; que son barreras físicas semipermeables que separan dos fases, impidiendo su íntimo contacto y restringiendo el movimiento de las moléculas a través de ella de forma selectiva (García et al. 2012), y por último el proceso biológico; se basa en el empleo de microorganismos, fundamentalmente bacterias, para la depuración de las mismas. (Arnáiz y Lsac Y Juman Lebrato 2000)

Sin embargo, las falencias que se presentan en el proceso de membrana y coagulación/floculación/sedimentación, es que transfieren contaminantes de una fase a otra o se concentran dentro de la misma fase por lo que es necesario implementar procesos de oxidación avanzada y lograr una desintegración adecuada. (Khan y Pathak 2020b)

6.1.6. Procesos de oxidación avanzada (AOP)

Se basa en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambio profundo en la estructura química de los contaminantes, haciendo una transformación en la materia orgánica. Los AOP implican la generación de radical hidroxilo (OH^\cdot) con una capacidad de oxidación muy alta. Entre los diferentes AOP, el ozono (O_3) es particularmente prometedor para el tratamiento de materiales recalcitrantes a escala industrial, en primer lugar, debido a su capacidad para producir altos niveles de OH^\cdot sin producir residuos y, en segundo lugar, debido a la posibilidad de tratar grandes flujos de agua a escala completa. El proceso O_3 presenta importantes eficiencias de eliminación de contaminantes cuando se aplica a varios compuestos tóxicos no biodegradables. (Domènech, Jardim y Litter 2001).

Figura 6. Mecanismos de fotocatalisis heterogénea.



Fuente: Mecanismo Fotocatalisis Heterogénea (Fuente: autores). | Download Scientific Diagram. (n.d.). Retrieved March 8, 2020, from https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Mecanismo-Fotocatalisis-Heterogénea-Fuente-autores_fig1_337040980.

De acuerdo con la *Figura 6. Mecanismos de fotocatalisis heterogénea.*, el principio de la fotocatalisis heterogénea, bajo condiciones de radiación UV, el material semiconductor apropiado puede ser excitado por fotones y producir pares de electrones y agujeros en la banda de conducción y valencia, estableciendo un ambiente redox en el medio de reacción. El proceso general depende principalmente de la generación de radicales hidroxilo que son capaces de convertir diversos tóxicos/contaminantes no biodegradables en productos finales no tóxicos como el CO_2 , H_2O y otros compuestos amigables con el medio ambiente (Khan y Pathak 2020b). Los portadores de carga generados iniciarán las reacciones de reducción u oxidación respectivamente (Bethi et al. 2016), con el fin de acelerar el proceso de reacción química.

- Proceso general de la fotocatalisis: un fotón de luz con energía igual o superior a la energía del intervalo de banda produce un par portador de carga. Como resultado de este cambio de energía, se produce la formación de electrones y huecos para producir hidróxido y otros radicales para la degradación de contaminantes orgánicos. (Khan y Pathak 2020b)
- Generación de radical hidroxilo: Estos radicales son especies muy reactivas y atacan cada molécula orgánica con constantes de velocidad por lo general en el

orden de $10^6 - 10^9 \text{ mol/L} \cdot \text{s}$. Estos radicales reaccionan con el contaminante sobre la superficie del fotocatalizador al iniciar varios resultados de reacción secuenciales y la degradación de los contaminantes orgánicos. (Khan y Pathak 2020b)

- Ozonización con peróxido húmedo ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$): puede producir una descomposición más rápida del ozono mediante la adición de peróxido de hidrógeno al ozono que conduce a la generación más rápida de radicales de hidroxilo OH^\cdot (Bethi et al. 2016), la reacción propuesta se describe a continuación:

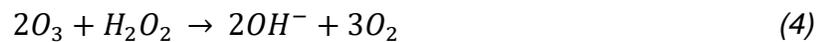
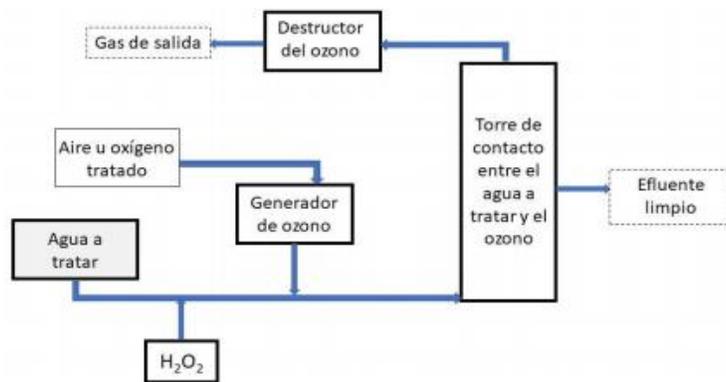


Figura 7. Equipos y proceso de la ozonización con peróxido de hidrógeno.



Fuente: TORICES, D.P., 2018. Procesos de oxidación avanzada: Avances recientes y tendencias futuras. Universidad de Cantabria, pp. 74. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/14217/409513.df?sequence=1>.

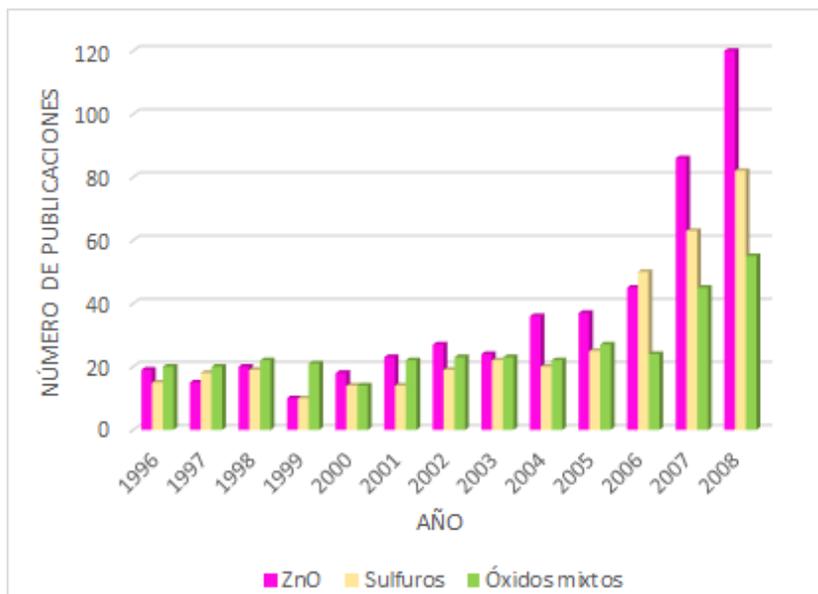
Figura 8. DAFO de los métodos de ozono.

Debilidades	Amenazas	Fortalezas	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> Afectan mucho parámetros como: pH Cantidad de iones hidróxido. Dosis de oxígeno 	<ul style="list-style-type: none"> De difícil uso, necesita agitación, No consigue la completa mineralización. En el caso de $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ es un proceso rápido pero caro 	<ul style="list-style-type: none"> El O_3: Es un gran oxidante y desinfectante. Es selectivo (afecta a los grupos ricos en e^-) Genera productos no tóxicos. 	<ul style="list-style-type: none"> La ozonización catalítica: Se generan más OH^\cdot, a mayor velocidad y produce con mejor eficiencia que en los otros casos.

Fuente: TORICES, D.P., 2018. Procesos de oxidación avanzada: Avances recientes y tendencias futuras. Universidad de Cantabria, pp. 74. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/14217/409513.df?sequence=1&isAllowed=>

- Óxido de zinc: Es un semiconductor de banda ancha debido a su banda directa, alta energía de unión excitónica a temperatura ambiente y absorbe una gran fracción de radiación. La fotocatalisis de ZnO en forma de suspensión/suspensión, es un importante proceso avanzado de oxidación para degradar los compuestos peligrosos, y este depende en gran medida de diversos parámetros operativos, como la condición de reacción, la fuente y la intensidad de la luz, la presencia de agente oxidante, pH y temperatura. (Khan y Pathak 2020b)
- La ventaja de usar semiconductores como fotocatalizadores, porque son: de bajo costo, no tóxicos, que tienen una alta relación de área superficial a volumen, que tienen espectros de absorción amplios con altos coeficientes de absorción, exhibe propiedades ajustables de tamaño, brinda facilidad para el proceso de transferencia de múltiples electrones y es capaz de un uso prolongado sin pérdida significativa de actividad foto-catalítica. (Khan y Pathak 2020b). Además (Yadav et al. 2006) identifica que con nano-partículas de ZnO, mejoran las propiedades de los textiles de algodón ante la aparición de los rayos UV. Se evidencia que las nano-partículas tienen propiedades de permeabilidad al aire y propiedad de absorción UV.

Figura 9. Evolución anual de publicaciones dedicadas a la fotocatalisis con materiales alternativos al TiO₂



Fuente: AHUMADA-LAZO, R., 2014. Crecimiento Y Caracterización De Películas De Óxido De Zinc Por " Sputtering " Para Su Potencial Aplicación En Fotocatalisis. , pp. 137.

- La intensidad de la radiación de luz juega un papel importante en la degradación completa del contaminante, para la degradación de compuestos extremadamente peligrosos como desechos farmacéuticos, toxinas, compuestos disruptores endocrinos y contaminantes importantes como fenol, colorantes azoicos y pesticidas. (Khan y Pathak 2020b).

9.1.6.1. Parámetros que influyen en el proceso de fotocatalisis heterogénea

pH: normalmente, el proceso de fotocatalisis es más eficiente en medio ácido $3 < \text{pH} < 5$. El pH afecta a las propiedades superficiales del catalizador y a la forma química del compuesto a degradar, y ello se manifiesta en alteraciones de la velocidad de degradación y en la tendencia a la floculación del catalizador. (Pey Clemente 2010)

Temperatura: la velocidad de las reacciones foto-catalíticas no se modifica apreciablemente con la variación de la temperatura del sistema, incluidos los ensayos llevados a cabo utilizando radiación solar. Este comportamiento es típico de reacciones iniciadas fotoquímicamente, por absorción de un fotón. (Pey Clemente 2010)

Diseño del reactor: los parámetros derivados del diseño y tipo del reactor juegan un importante papel en el resultado final de la reacción; factores como geometría, óptica, distribución de luz, tipo de flujo los cuales influyen en el rendimiento final del proceso. (Pey Clemente 2010)

Los agentes oxidantes son imprescindibles para la degradación del contaminante, ya que participan en la reacción de oxidación y son los responsables de una de las dos semirreacciones; cuanto más eficaz sea el agente oxidante, mayor será la velocidad del proceso. Después del oxígeno, el peróxido de hidrógeno es el agente oxidante más extensamente estudiado. En la gran mayoría de los casos, la velocidad del proceso aumenta de acuerdo con la siguiente secuencia: $\text{O}_2 < \text{H}_2\text{O}_2 < (\text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2)$. (Blanco Gálvez et al.)

6.1.7. Síntesis de Nanopartículas de ZnO

Es de gran importancia producir materiales a nano-escala ZnO de alta calidad para investigaciones, así como para aplicaciones industriales y de alta tecnología. Los materiales a nano-escala de ZnO tienen varias aplicaciones, desde diodos emisores

de luz (LED), filtros de onda acústica superficial, cristales, foto-detectores, fotodiodos, guías de onda de modulador óptico, sensores de gas y varistores⁵, células solares, debido a su amplia banda (3,37 eV), gran energía de unión al excitón (60 meV), excelente estabilidad química y estabilidad térmica.

El polvo de Z_nO con una capa metálica envuelta, exhibe buena conductividad eléctrica y transmisión óptica en la región visible. El óxido de zinc (Z_nO) también tiene ventajas prácticas como el hecho de no ser tóxico, es barato y abundante en la tierra. Los nano-materiales tienen una amplia gama de aplicaciones debido a su tamaño y morfología, y han sido un tema importante en los campos de las ciencias básicas y aplicadas. Entre las diversas nano-partículas, las nano-partículas de óxido de zinc (ZNP) son semiconductores versátiles que muestran una gran transparencia óptica y propiedades luminiscentes en los métodos de UV-Vis⁶, con una excelente estabilidad química y térmica.

Existen varios métodos físicos y químicos para la síntesis de nanopartículas del óxido de zinc (Z_nO) como lo son:

- Métodos físicos: En estos métodos se encuentran técnicas basadas en la evaporación; es un método común para obtener mediante deposición, delgadas capas de un material. Varias técnicas de evaporación se emplean en la fabricación y síntesis de nano-materiales, como por ejemplo la evaporación térmica o la deposición asistida mediante haces de iones (Savi, Rodrigues y Bernardin). También se encuentra el Spray pirolisis que se obtiene directamente al pulverizar una disolución sobre una superficie-sustrato previamente calentada (Perednis et al. 2005). La condensación en gas inerte consiste en la evaporación de un material (helio o el argón) en el seno de un gas frío e inerte en condiciones de baja presión. Los átomos o moléculas evaporados sufren una condensación al perder energía en los choques con los átomos del gas inerte. De este modo, un flujo convectivo de gas inerte pasa sobre la fuente de evaporación y transporta las nano-partículas formadas en su seno hacia un soporte cuya superficie está refrigerada (Sanz 2016).

⁵ Varistores: son componentes electrónicos con una curva característica similar a la del diodo. Suelen usarse para proteger circuitos contra variaciones de tensión. Incorporarlos en un circuito de portero o video-portero, evita que las irregularidades en la alimentación dañen componentes sensibles («¿Que es un varistor? » Blog de TDTprofesional»).

⁶ La espectroscopía UV-Vis está basada en el proceso de absorción de la radiación ultravioleta-visible (radiación con longitud de onda comprendida entre los 160 y 780 nm) por una molécula. (D. Torikai, B. Barazani, E. Ono, M. F. M. Santos 2011)

- Métodos químicos: Consisten en la transformación de las nanopartículas a escala molecular. El método sol-gel es conocido bajo secado supercrítico de alcohol etílico. Las propiedades estructurales mostraron que las nanopartículas de ZnO exhiben de estructura wurtzita hexagonal. Por lo tanto, en el caso de tratamiento térmico a $500^{\circ}C$ en el aire, el polvo con un tamaño medio de partícula de 40 nm muestra una fuerte banda luminiscente, alrededor de 384 nm en el rango UV. Se investigó la fotoluminiscencia y la conductividad eléctrica de las nano-partículas ZnO en Omri (et al. 2014). Este método, también conocido como deposición de solución química, es un enfoque de síntesis química húmeda que puede usarse para generar nano-partículas por gelificación, precipitación y tratamiento hidrotérmico.

Otro método químico conocido es la espectroscopia de absorción; es una técnica poderosa para explorar las propiedades ópticas de las nanopartículas. Los espectros de absorción de nanopartículas de ZnO para diferentes temperaturas de tratamiento térmico en el rango UV y Visible. La Reducción química es uno de los métodos más comunes para la obtención de nanopartículas. Esta ruta consiste con la preparación de una disolución de una sal metálica junto a agentes estabilizantes. La mezcla resultante es calentada hasta una temperatura dada bajo agitación, en ocasiones llegándose a formar un proceso de reflujo. Las nanopartículas formadas son separadas de la disolución mediante filtración o centrifugación y posteriormente lavadas. (Sanz 2016)

La Síntesis verde de nano partículas por sistemas biológicos, especialmente los extractos de plantas, se ha convertido en un campo emergente en nanotecnología (Fakhari, Jamzad y Kabiri Fard 2019). En la tesis del PhD. Bolivar (2018) dice que, la integración del concepto de química verde en los principios de producción de nanomateriales ha alcanzado importantes niveles de aceptación ya que se garantiza un futuro de mayor sostenibilidad y reducción de riesgo. Los nanomateriales obtenidos por síntesis verde plantean un importante enfoque que exige el uso de reactivos benignos, provenientes de fuentes naturales, disolventes no peligrosos acompañados de procesos con mayor eficiencia energética.

6.1.8. Análisis de ciclo de vida

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta de gestión medioambiental cuya finalidad es analizar de forma objetiva, metódica, sistemática y científica, el

impacto ambiental originado por un proceso/producto durante su ciclo de vida completo. (Haya Leiva 2016)

El ACV no es una evaluación de riesgo. Se debe a que este análisis no tiene en cuenta la exposición, que es un factor esencial para evaluar el riesgo. El ACV cuantifica las emisiones, pero el impacto real de esas emisiones depende de cuándo, dónde y cómo se liberen en el ambiente («Análisis y Gestión Ambiental» 2013).

En la norma UNE-EN ISO 14040 (Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia), se define el Análisis de Ciclo de Vida como una técnica que trata los aspectos medioambientales y los impactos ambientales potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto, mediante:

- La recopilación de un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema del producto (producto/proceso en estudio).
- La evaluación de los potenciales impactos medioambientales asociados con las entradas y salidas identificadas en el inventario.
- La interpretación de los resultados de las fases de análisis de inventario y evaluación de impacto de acuerdo con los objetivos del estudio.

La SETAC⁷ definió el Análisis del Ciclo de Vida como: "Un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando el uso de la materia y de la energía, así como las emisiones o los vertidos al entorno, para determinar el impacto de ese uso de recursos y esas emisiones o vertidos, con el fin de evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental. El estudio incluye el ciclo completo del producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta las etapas de: extracción y procesamiento de materias primas, producción, transporte y distribución, uso, reutilización y mantenimiento, reciclado y disposición final."

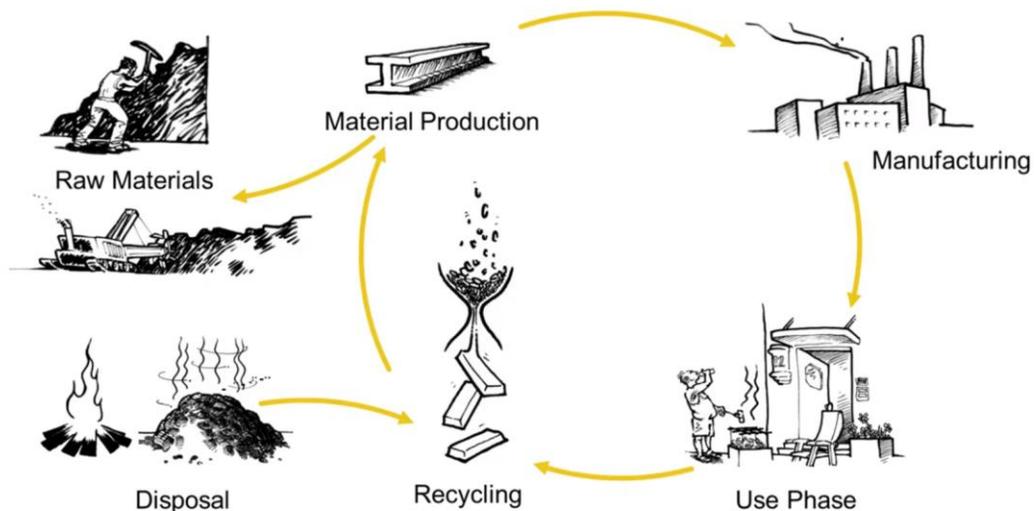
Existen tres tipos de ACV: conceptual, simplificado y completo. El proyecto presenta el ACV completo, el cual es el nivel más complejo, que consiste en realizar un análisis en detalle, tanto del inventario como de los impactos, de forma cualitativa y cuantitativa, cubriéndose de las etapas que los demás tipos de ACV.

⁷ La fundación de la SETAC (Society for Environmental Toxicology and Chemistry) en 1979.

6.1.8.1. Etapas del ciclo de vida

En el contexto del Análisis del Ciclo de Vida, se incluye el estudio y la cuantificación de los impactos ambientales asociados a la vida de un producto, proceso o actividad desde “la cuna a la tumba”, esto es, el conjunto de las siguientes etapas: adquisición de materias primas, fabricación, distribución, uso y fin de vida útil. Cada una de estas etapas tiene asociados unos inputs (principalmente consumo de materias primas y energía) y unos outputs (esencialmente residuos y emisiones). (Haya Leiva 2016)

Figura 10. Etapas del ciclo de vida.



Fuente: |SPHERA. LCA and introduction to GaBi: GaBi Software. GaBi [en línea]. [Consulta: 20 agosto 2020]. Disponible en: <http://www.gabi-software.com/support/gabi-learning-center/gabi-learning-center/part-1-lca-and-introduction-to-gabi/>. Video 2. ISO 14044, Goal, scope and functional units.

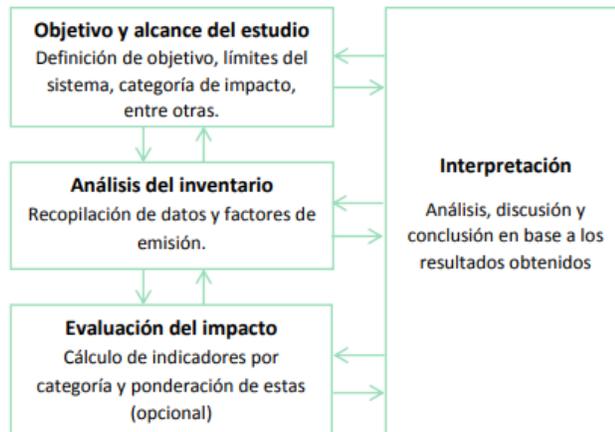
En la *Figura 10. Etapas del ciclo de vida.*, se logra observar las diferentes etapas que conforman el ciclo de vida, y de acuerdo al alcance del desarrollo de un análisis de ciclo de vida se logran encontrar las diferentes metodologías según (Haya Leiva 2016):

- De la puerta a la puerta (Gate to gate): considera únicamente las actividades (proceso productivo) de la empresa a la que se aplica.
- De la cuna a la puerta (Cradle to gate): toma en consideración desde la extracción y acondicionamiento de materias primas hasta el proceso productivo de la empresa.

- De la puerta a la tumba (Gate to grave): considera el proceso productivo de la empresa y abarca hasta la fase de gestión de los residuos a que da lugar el producto.
- De la cuna a la tumba (Cradle to grave): estudia desde el acondicionamiento de las materias primas hasta la gestión última de los residuos (reciclaje u otros).
- De la cuna a la cuna (Cradle to cradle): considera el ciclo de vida completo del producto, ya que abarca desde el acondicionamiento de las materias primas hasta que el producto, tras quedar fuera de uso, es reintroducido en el mismo proceso productivo o en otro.

Para la realización de un análisis de ciclo de vida, se cuenta con cuatro fases: definición del objetivo y alcance, análisis del inventario, evaluación del impacto e interpretación tal como se muestra en la *Figura 11. Marco de referencia de un Análisis del Ciclo de Vida, junto a las principales actividades a realizar en cada etapa* que corresponde a una técnica iterativa y que cada fase depende de los resultados y análisis de las fases anteriores.

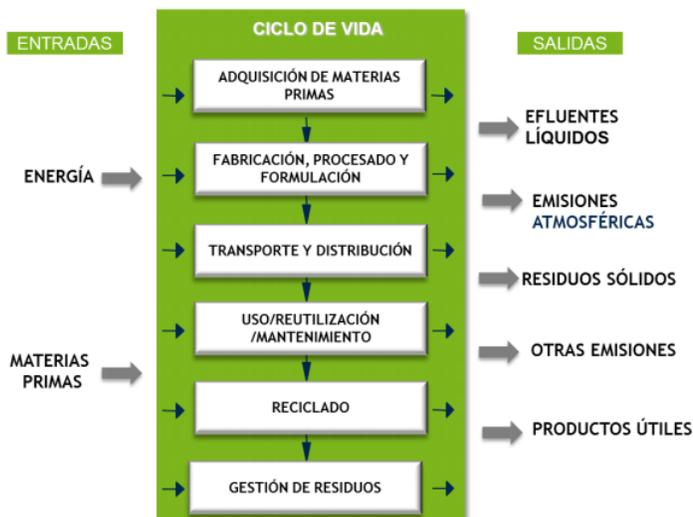
Figura 11. Marco de referencia de un Análisis del Ciclo de Vida, junto a las principales actividades a realizar en cada etapa



Fuente: RIFFO RIVAS, J.P., 2017. *Análisis de ciclo de vida de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en Lima*. S.l.: Universidad de Chile.

Además, dentro de este análisis de ciclo de vida se definen unos límites del sistema, en base a las etapas que se pueden considerar tanto en las entradas y salidas de cada proceso a evaluar y asimismo tomar la decisión de una mejora ambiental, en la *Figura 12. Análisis de Ciclo de Vida - Entradas y Salidas.*, se logra observar el análisis de ciclo de vida tomando referencias de entrada y salida de cada proceso considerado, en este caso 6 procesos.

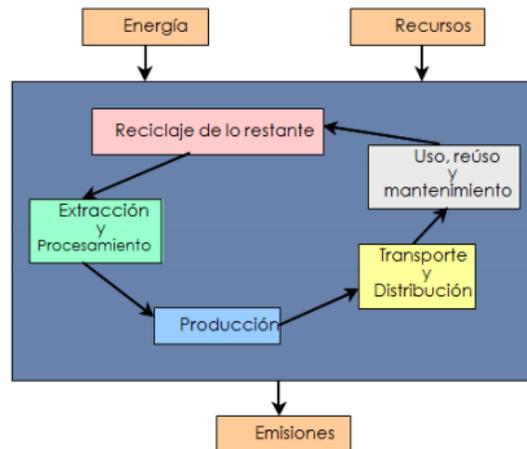
Figura 12. Análisis de Ciclo de Vida - Entradas y Salidas.



Fuente: HAYA LEIVA, E., 2016. Análisis de Ciclo de Vida Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental. [en línea], pp. 43. Disponible en: https://static.eoi.es/savia/documents/teoria_acv_migma1.pdf.

Para explicar un ejemplo de esquema que puede llegarse a presentar, se toma en cuenta la *Figura 13. Ejemplo del método de Análisis de ciclo de vida.*, de unos aportes en Barcelona, para docentes. El siguiente esquema representa y tiene en cuenta el concepto de economía circular, evidenciando las entradas y salidas.

Figura 13. Ejemplo del método de Análisis de ciclo de vida.



Fuente: Análisis y Gestión Ambiental. [en línea], 2013. Disponible en: https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250504/2013/1.4. Análisis de ciclo de vida.pdf.

En cuanto a la evaluación de impacto ambiental este relaciona los resultados de análisis de inventario con los efectos ambientales que dan lugar, es decir de las entradas y salidas arrojadas por el análisis de ciclo de vida de cada proceso, no se trata de determinar impactos reales sino de relacionar los datos obtenidos en el inventario con cada categoría de impacto y cuantificar la contribución ambiental de cada uno de estos. En la *Figura 14. Elementos de la fase de Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida.*, se puede observar que para la evaluación de impacto del ciclo de vida consta de cuatro elementos:

Figura 14. Elementos de la fase de Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida.



Fuente: HAYA LEIVA, E., 2016. Análisis de Ciclo de Vida Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental. [en línea], pp. 43. Disponible en: https://static.eoi.es/savia/documents/teoria_acv_migma1.pdf.

6.1.9. Herramienta informática utilizada

En cuanto al análisis de ciclo de vida incluye el análisis del inventario (Life Cycle Inventory Analysis LCIA) y la evaluación del impacto de ciclo de vida (Life Cycle Impact Assessment LCIA). Esta metodología permite identificar y evaluar las cargas ambientales asociadas al ciclo de vida de materiales y servicios a lo largo de su proceso productivo. La metodología ACV se basa en el enfoque “desde la cuna a la tumba” y permite la identificación y evaluación sistemática de las oportunidades para minimizar las consecuencias medioambientales del uso de los recursos naturales y las cargas medioambientales.

Es una herramienta innovadora que permite diseñar un producto desde su origen y mejorar sus características ambientales, económicas y saludables. Se usa también en la parte empresarial y funciona como base para realizar trabajos ecoamigables con el ambiente. Su análisis es complejo ya que puede medir el impacto del cambio climático, agotamiento de Ozono, Acidificación, agotamiento de recursos abióticos y uso de suelo entre otras.

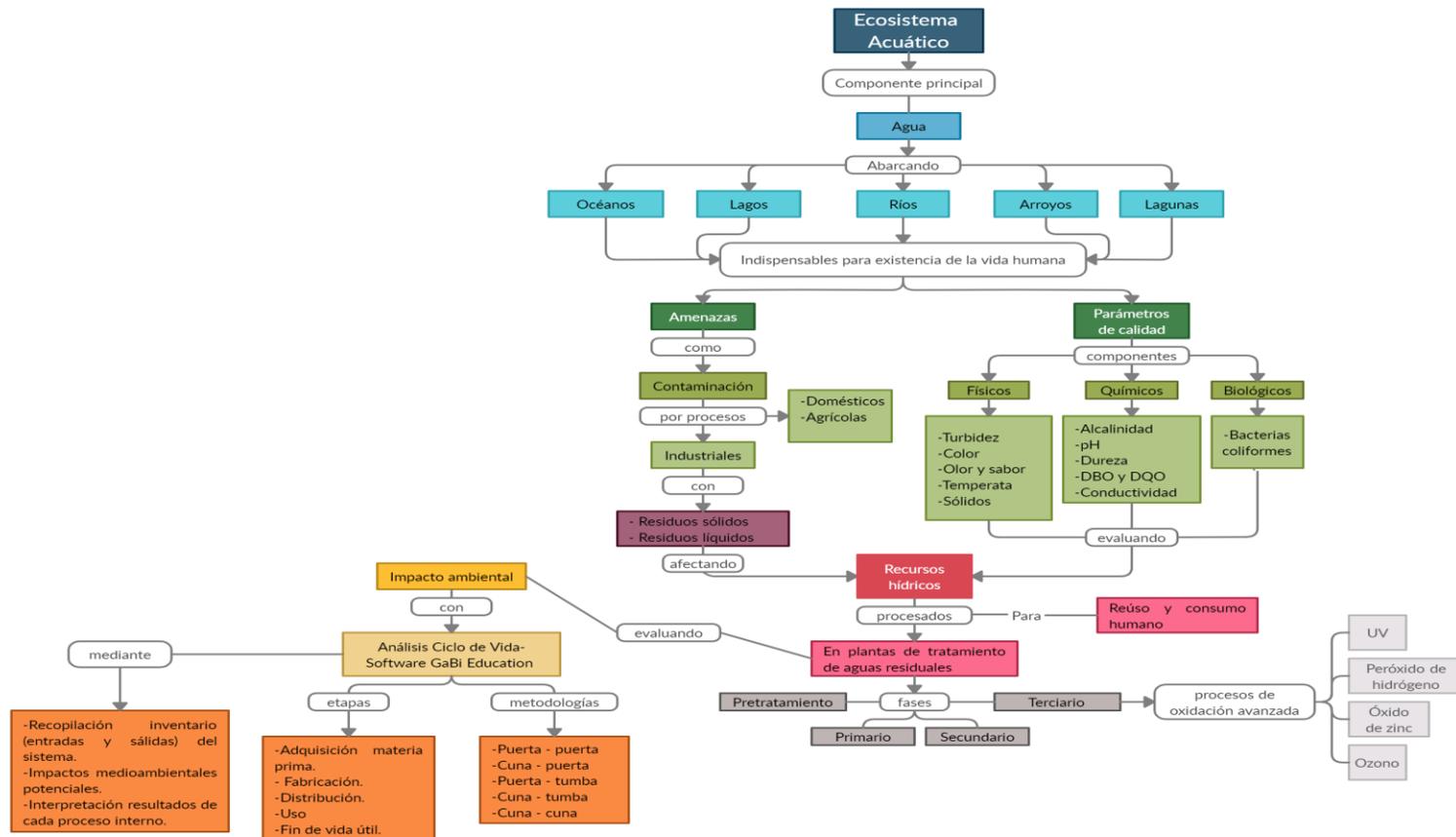
GaBi es una herramienta que contiene elementos necesarios para modelar productos y sistemas. Se pueden construir modelos para cualquier producto, balances de entrada y salida de emisiones, materiales y energía y la opción de modificar los parámetros en cualquier momento (Cortés 2015). Permite también la exploración de la base de datos existentes en diferentes partes del mundo, siendo esta la mayor base de datos de ACV en el mercado y contiene más de 7,000 perfiles de inventario listos para el uso de ciclo de vida, convirtiéndose en una herramienta útil al momento de evaluar y brindar información alusiva a los resultados efectuados en un proceso de tratamiento de aguas, como los impactos ambientales de productos, procesos y actividades.

Adicional a eso, GaBi permite realizar estudios de Huella de Carbono, huella de agua e hídrica, declaración ambiental de productos, huella ambiental de la Unión Europea, ecodiseño, etc. (ISM Instituto Superior del Medio Ambiente 2020). Todos estos análisis los presenta por medio de gráficas, llevándola a una herramienta que facilita el análisis de los resultados.

6.2. MARCO CONCEPTUAL

Para contextualizar los conceptos encontrados en el presente marco teórico y encontrarles una secuencia lógica adicional al proyecto, se hace el siguiente esquema que corresponde a la *Figura 15. Mapa conceptual.*, identificando la relación de los temas a tener en cuenta; empezando con el ecosistema acuático hasta los tratamientos adecuados y generales para el desarrollo de los objetivos que se proponen.

Figura 15. Mapa conceptual.



Fuente: Los autores.

6.3. MARCO LEGAL

NORMAS	ARTÍCULOS/ CAPÍTULOS	DESCRIPCIÓN
<p>Decreto 1076 de 2015. Decreto único reglamentario del Sector de Ambiente y Desarrollo Sostenible a partir de la fecha del 26 de agosto de 2019</p>	Art. 2.2.1.1.18.1	Explica la protección y aprovechamiento de las aguas; se observan las normas que establezcan el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el ICA para proteger la calidad de los recursos en materia de aplicación de productos de agroquímicos, donde obliga a no contaminar los cuerpos de agua con sustancias nocivas al ecosistema, no provocar alteraciones, y el buen aprovechamiento de los flujos naturales de aguas.
	Art. 2.2.1.1.18.7	Se evidencia que se debe Informar a la autoridad ambiental competente en forma inmediata si dentro de sus predios o predios vecinos, o en aguas ribereñas, se producen deterioros en los recursos naturales renovables por causas naturales o por el hecho de terceros, o existe el peligro de que se produzcan, y a cooperar en las labores de prevención o corrección que adelante la autoridad ambiental competente.
	Art. 2.2.3.3.4.7	Fija los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir los vertimientos puntuales a las aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.
<p>Constitución política de Colombia de 1991 de la República de Colombia</p>	Art.49	Establece que el saneamiento ambiental es un servicio público a cargo del Estado.
	Art. 50	Establecen como obligación del Estado, proteger la diversidad e integridad del ambiente; fomentar la educación ambiental; prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental; imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.
<p>Decreto 3930 del 25 de octubre del 2010, se reglamenta el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI – Parte III – Libro II del Decreto – Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.</p>	Art. 7 y 8.	Describe los parámetros que se evalúan para el conocimiento de cómo obtener o extraer valores de la calidad de cualquier recurso hídrico, y parámetros descritos también en el marco teórico del presente proyecto.
	Art. 28.	Muestran la Fijación de la norma de vertimiento, donde El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial fijará los parámetros y los límites máximos permisibles de los vertimientos a las aguas superficiales, marinas, a los sistemas de alcantarillado público y al suelo.
	Art. 43.	Cada empresa, o industria debe tener un permiso de vertimientos, evaluando el impacto generado ambiental mente por el vertimiento generado.
	Art. 62	<p>Muestra el Plan de Reconversión a Tecnologías Limpias en Gestión de Vertimientos, explicando que es un mecanismo que promueve la reconversión tecnológica de los procesos productivos de los generadores de vertimientos que desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios, y que además de dar cumplimiento a la norma de vertimiento, debe dar cumplimiento a los siguientes objetivos:</p> <p>Reducir y minimizar la carga contaminante por unidad de producción, antes del sistema de tratamiento o antes de ser mezclada con aguas residuales domésticas.</p> <p>Reutilizar o reciclar subproductos o materias primas, por unidad de producción o incorporar a los procesos de producción materiales reciclados, relacionados con la generación de vertimientos.</p>

NORMAS	ARTÍCULOS/ CAPÍTULOS	DESCRIPCIÓN
Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015 del ministro de ambiente y desarrollo sostenible.	Capítulo II, Art. 3.	Describe valores de límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos hídricos superficiales de aguas residuales, de los sectores económicos como lo son: agrícola, doméstico, industrial, agroindustrial etc. Muestra el cumplimiento de la norma de vertimientos cuando la captación y la descarga se realicen en el mismo cuerpo de agua superficial, se procede a realizar la sustracción del valor de la carga másica (Kg) de los metales y metaloides y de los elementos o sustancias por la utilización directa o indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales; calculando así valores de concentraciones.
	Capítulo VI, Art. 13	Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas (ARnD) de las actividades de fabricación y manufactura de bienes, de acuerdo a la actividad: fabricación de productos textiles.
Resolución 0883 del 18 de mayo de 2018 del ministro de ambiente y desarrollo sostenible.	Capítulo II, Art. 3.	Describe valores de límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas marinas de aguas residuales, de los sectores económicos como lo son: agrícola, doméstico, industrial, agroindustrial, ganadera, minera, fabricación y manufacturas de bienes Muestra el cumplimiento de la norma de vertimientos cuando la captación y la descarga se realicen en el mismo cuerpo de agua marino , se procede a realizar la sustracción del valor de la carga másica (Kg) de los metales y metaloides y de los elementos o sustancias por la utilización directa o indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales; calculando así valores de concentraciones.
Ley 373 de 1997 del Congreso de Colombia.		Establece el reúso obligatorio de las aguas de origen superficial, subterráneo o de lluvias utilizadas en actividades que generen afluentes líquidos, previo a un análisis técnico, socioeconómico y de normas de calidad ambiental.
Resolución 64/292 del 28 de julio de 2010 de la Asamblea General de las Naciones Unidas.		Declara el acceso seguro a un agua potable salubre y al saneamiento como un derecho humano fundamental para el completo disfrute de la vida y de todos los demás derechos humanos.
Resolución 1207 del 25 de julio de 2014 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Art. 1	Tiene por objeto establecer las disposiciones relacionadas con el uso del agua residual tratada y no aplica para su empleo como fertilizante o acondicionador de suelos.
	Art. 6	Las aguas residuales tratadas se podrán utilizar en los usos industriales en actividades de: Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas, descarga de aparatos sanitarios, limpieza mecánica de vía, riego de vías para el control de material particulado y sistemas de redes contra incendios
	Art. 7.	Dicta los criterios de calidad en el uso de agua residual tratada, donde el uso industrial contiene valores límite permisibles fisicoquímicos, microbiológicos, químicos, biosidas, iones, metales, metaloides, no metales y DBO ₅ .
NTC ISO 14040 de 2007 (NORMA UNE-EN ISO 14040 de 2006)		Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Ésta norma es una adaptación idéntica por traducción (IDT) de la norma ISO 14040 de 2006.
NORMA UNE-EN ISO 14044		Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y Directrices. (ISO 14044 de 2006).

7. OBJETIVOS

7.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el impacto ambiental generado por un sistema de tratamiento convencional de agua residual textil en comparación a la modificación con un sistema de oxidación avanzada foto-catalítico.

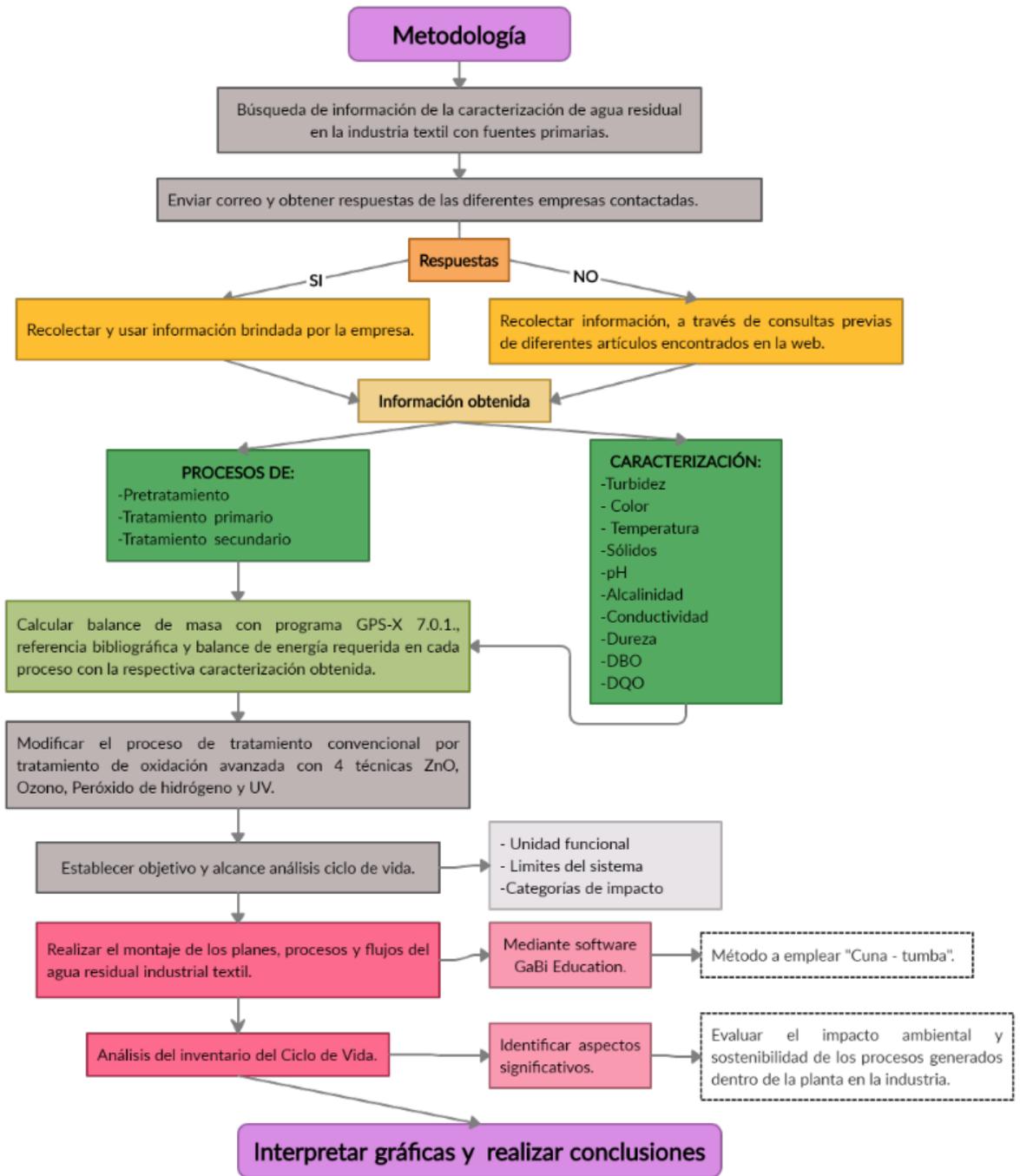
7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer los parámetros de calidad de agua residuales generadas por una industria textil.
- Realizar los balances de masa y energía llevados a cabo en el proceso de tratamiento del agua.
- Comparar los impactos ambientales generados entre varios escenarios de industrias textiles y proponer un proceso de tratamiento de oxidación avanzada.

8. METODOLOGÍA

8.1. ESQUEMA METODOLÓGICO

Figura 16. Esquema metodológico.



Fuente: Los autores.

8.2. BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN

Para la búsqueda principal de la información, se tuvo en cuenta caracterizaciones que cumplieran con los componentes de agua residual en la industria textil, como el color, contenido de grasas, fenoles, entre otros. Una buena caracterización del agua problema ayuda al buen desarrollo del proyecto, siendo dichos compuestos los más verídicos y cercanos a la actualidad. Luego de varias investigaciones en diferentes bases de datos, envío de correos a empresas de diferentes sectores de la industria en Colombia, y en específico de la industria textil, se logró llegar a la información de la empresa que brinda información, ayudando a la investigación y estudio del proyecto.

Con la caracterización del agua residual de la industria textil se identifican los parámetros fundamentales para la calidad del agua presentada en la *Tabla 6. Parámetros de calidad de agua a estudiar*

Tabla 6. Parámetros de calidad de agua a estudiar

PARÁMETROS	UNIDADES
Turbidez	NTU
Color	UPC
Temperatura	°C
Sólidos	mg/L
pH	Unidades de pH
Alcalinidad	mg/L
Conductividad	μS/cm
Dureza	mg/L
DQO	mg/L

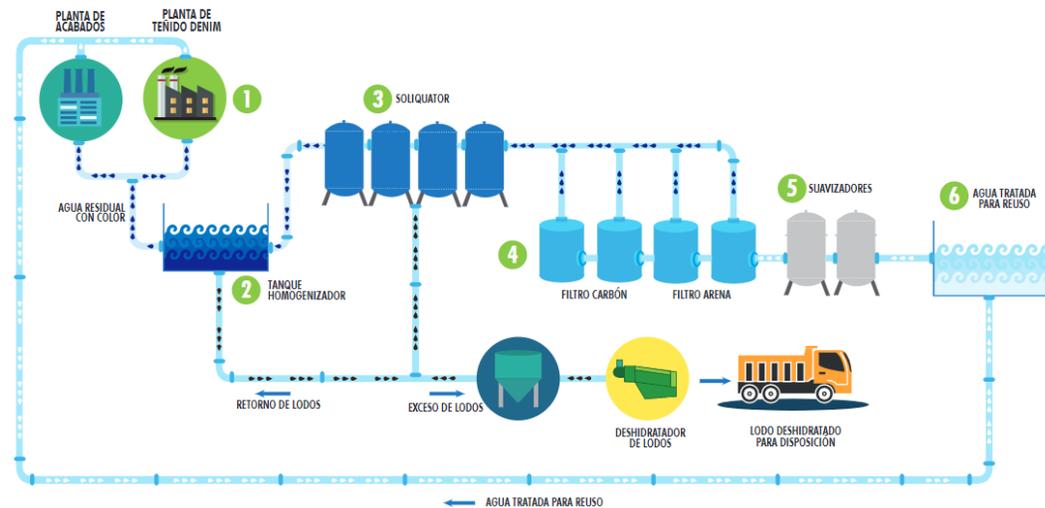
Fuente: APHA, AWWA y WEF, 2017. 3120 B. Inductively Coupled Plasma (ICP) Method. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association, pp. 1-5.

8.3. INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR LA EMPRESA

Se evaluó el impacto ambiental de una planta de tratamiento de agua residual de una industria textil, que por condiciones de confidencialidad no será dado su nombre. La información que la empresa suministro al presente proyecto, ayudo al

desarrollo de diferentes cálculos en cuanto a valores más cercanos a la realidad de diferentes parámetros de calidad del agua, con relación a diferentes teorías, estudios similares y complementos, para la simulación del proceso que se llevó a cabo en la industria.

Figura 17. Flujo del proceso en la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la compañía colombiana.



Fuente: Empresa textil.

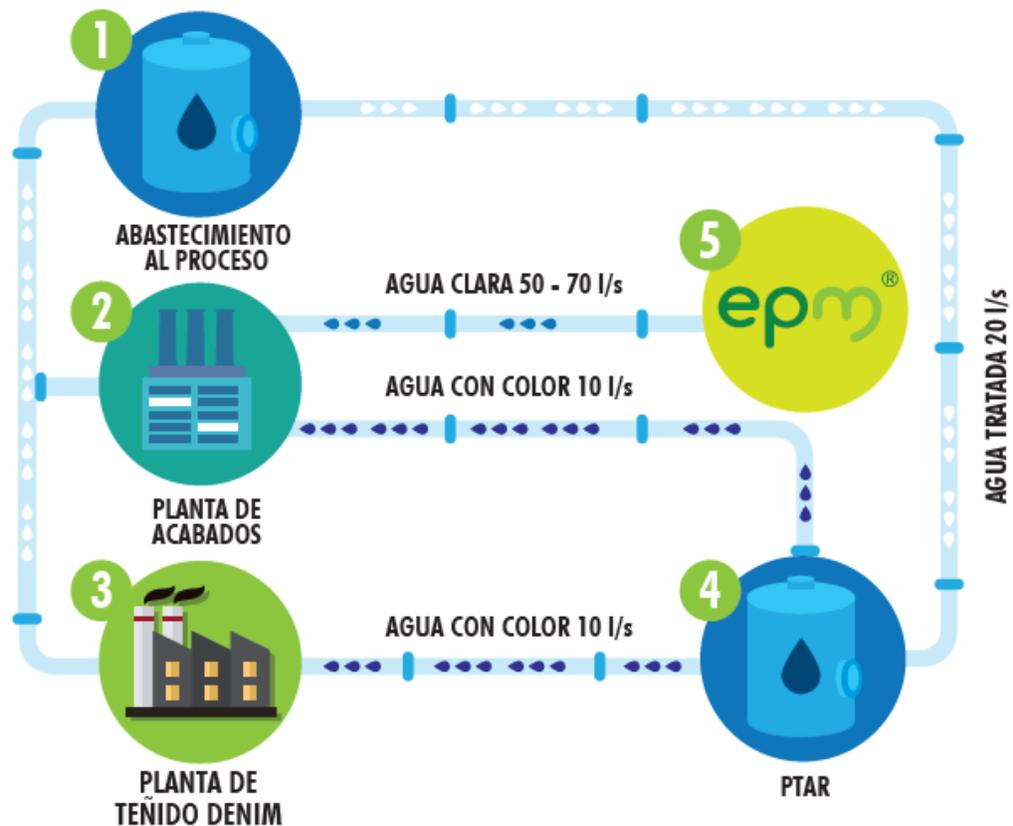
Como se puede observar en la *Figura 17. Flujo del proceso en la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la compañía colombiana.*, se identifican cada uno de los procesos que la empresa maneja desde la planta de acabados y de teñido Denim⁸, siendo éste un sistema económico circular.

Se entiende por economía circular como un sistema de aprovechamiento de recursos, donde prima la reducción de los elementos; minimiza la producción al mínimo indispensable, reutilizando los elementos que por sus propiedades no pueden volver al medio ambiente. A diferencia de otros modelos económicos donde prima el aspecto económico por encima del social o medio ambiental, éste sistema supone una sustancial mejora común tanto para empresas como para los consumidores. Las empresas que han puesto en práctica este sistema están comprobando que reutilizar los recursos resulta mucho más rentable que crearlos desde cero. Como consecuencia, los precios de producción se reducen, de manera

⁸ La mezclilla o denim es un tejido empleado en la confección de ropa de trabajo. Esta tela de lona comenzó a hacerse popular debido a su resistencia y durabilidad, ya que en sus comienzos era empleada para la realización de velas para barcos, tiendas de campaña, toldos y lonas (Eadaoems 2011).

que el precio de venta también se ve rebajado, beneficiando así al consumidor; no sólo en lo económico, sino también en la vertiente social y medio ambiental. (Font 2020).

Figura 18. Sistema económico circular de la empresa colombiana.



Fuente: Empresa textil.

8.3.1. Estudio de agua residual en la empresa

Se desarrolló un estudio del agua residual en la empresa donde, al ser interesada en realizar monitoreos periódicos de sus vertimientos y determinar la calidad de sus aguas residuales no domésticas. Presenta un informe con resultados obtenidos en el año 2018. En el estudio se presenta la siguiente caracterización:

Tabla 7. Variables analizadas en el laboratorio (caracterización del agua en la salida del proceso de tratamiento de la empresa)

VARIABLES(UNIDADES)	SALIDA
Acidez Total (mg/L)	<5,0
Alcalinidad Total (mg/L CaCO ₃)	585,0
AOX	<0,10
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno) (mg/L)	<0,010
Cadmio Cd (mg/L)	<0,002
Cinc Zn (mg/L)	0,027
Cobalto Co (mg/L)	<0,01
Cobre (Cu) (mg/L)	0,026
Color Real (Longitudes de onda: 436 nm, M-1)	1,14
Color Real (Longitudes de onda: 525 nm, M-1)	0,52
Color Real (Longitudes de onda: 620 nm, M-1)	0,40
Cloruros Cl (mg/L)	283,326
Cromo-Cr(mg/L)	<0,011
DBO ₅ (mg/L O ₂)	86
DQO (mg/L O ₂)	306
Dureza Cálrica (mg/L CaCO ₃)	19,5
Dureza Total (mg/L CaCO ₃)	32,0
Fenoles Totales (mg/L)	0,11
Fósforo Total P (mg/L)	1,279
Grasas y Aceites (mg/L)	13
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos HAP (mg/L)	<0,005
Hidrocarburos Totales (mg/L)	5,75
Nitratos N-NO ₃ (mg/L)	<1,000
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃) (mg/L)	<5,00
Nitrógeno Total K N (mg/L)	10,00
Níquel Ni (mg/L)	0,019
Ortofosfatos P-PO ₄ ³⁻ (mg/L)	<1,500
Sólidos Suspendedos Totales (mg/L)	27
Sulfatos (SO ₄ ²⁻) (mg/L)	142,998
Sulfuros (S ₂) (mg/L)	<1,000
Sustancias activas de azul de metileno (mg/L)	0,56

Nota: < Menor que el límite de cuantificación del método; * Ver reporte de resultados para conocer el valor de cada uno de los compuestos

Fuente: Empresa textil

La caracterización de la *Tabla 7. Variables analizadas en el laboratorio (caracterización del agua en la salida del proceso de tratamiento de la empresa)*, corresponde a los resultados de laboratorio que se obtuvieron de las muestras de agua, de la salida del proceso antes del reúso al abastecimiento de la misma industria. Estas características fueron entregadas al Jefe de gestión ambiental de la empresa, quien puso a disposición el personal necesario para garantizar el cumplimiento de las normas internas del sitio de trabajo y la verificación en los procedimientos de toma y manejo de muestras.

Con esta información, la empresa realizó una comparación y verificación de acuerdo con la resolución 0631, Capítulo VI, Artículo 13: "Actividades asociadas con servicios y otras actividades con vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales, de acuerdo a la actividad fabricación de productos textiles", que garantiza el cumplimiento con la norma, en la *Tabla 8. Comparativo de la caracterización con la Resolución 0631 de 2015, Capítulo VI, Art. 13.*

Tabla 8. Comparativo de la caracterización con la Resolución 0631 de 2015, Capítulo VI, Art. 13.

Parámetro-sigla(Unidades)	Valores límites máximos permisibles	Valor obtenido salida del sistema	Cumple o No Cumple
Generales			
pH (Unidades de pH)	5,0-9,0	Min. 7,34 Max. 7,95	Cumple
Temperatura(°C)	40,0	Min. 30,10 Max. 36,60	Cumple
DQO (mg/L O ₂)	600,00	306	Cumple
DBO ₅ (mg/L O ₂)	300,00	86	Cumple
SST (mg/L)	75,00	27	Cumple
Sólidos Sed. (ml/L-h)	3,00	Min. 0,1 Max. 0,8	Cumple
Grasas y Aceites (mg/L)	30,00	13	Cumple
Fenoles (mg/L)	0,20	0,11	Cumple
Sustancias activas de azul de metileno (SAAM)	Análisis y Reporte	0,56	Análisis y Reporte
Hidrocarburos			
Hidrocarburos Totales (HTP) (mg/L)	10,00	5,75	Cumple
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) (mg/L)	Análisis y Reporte	<0,005	Análisis y Reporte
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno) (mg/L)	Análisis y Reporte	<0,010	Análisis y Reporte
AOX	Análisis y Reporte	<0,10	Análisis y Reporte
Compuestos de Fósforo			
Fósforo Total (P) (mg/L)	Análisis y Reporte	1,279	Análisis y Reporte
Ortofatos P-PO ₄ ³⁻ (mg/L)	Análisis y Reporte	<1,500	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno			
Nitratos (N-NO ₃) (mg/L)	Análisis y Reporte	<1,000	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃) (mg/L)	Análisis y Reporte	<5,00	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total K (N) (mg/L)	Análisis y Reporte	10,00	Análisis y Reporte
Iones			
Cloruros (Cl) (mg/L)	1.200,00	283,326	Cumple
Sulfatos (SO ₄ ²⁻) (mg/L)	Análisis y Reporte	142,998	Análisis y Reporte
Sulfuros (S ₂) (mg/L)	1,00	<1,000	Cumple
Metales y metaloides			
Cadmio (Cd) (mg/L)	0,02	<0,002	Cumple
Cinc (Zn) (mg/L)	3,00	0,027	Cumple
Cobalto (Co) (mg/L)	0,50	<0,01	Cumple
Cobre (Cu) (mg/L)	1,00	0,026	Cumple
Cromo-Cr(mg/L)	0,50	<0,011	Cumple
Níquel (Ni) (mg/L)	0,50	0,019	Cumple
Otros Parámetros para Análisis y Reportes			
Acidez Total (mg/L)	Análisis y Reporte	<5,0	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total (mg/L CaCO ₃)	Análisis y Reporte	585,0	Análisis y Reporte
Dureza Cálctica (mg/L CaCO ₃)	Análisis y Reporte	19,5	Análisis y Reporte
Dureza Total (mg/L CaCO ₃)	Análisis y Reporte	32,0	Análisis y Reporte
Color Real (Longitudes de onda: 436 nm, M-1)	Análisis y Reporte	1,14	Análisis y Reporte
Color Real (Longitudes de onda: 525 nm, M-1)	Análisis y Reporte	0,52	Análisis y Reporte
Color Real (Longitudes de onda: 620 nm, M-1)	Análisis y Reporte	0,40	Análisis y Reporte

Fuente: Empresa textil

Adicional a eso, se recibió un archivo de datos anexos de la entrada y salida con parámetros muy generales del agua residual del año 2020, como complemento a la investigación, donde se identifica la entrada y la salida de cada proceso. Estos datos se encuentran (enumerados y en colores) en la *Tabla 9. Informe de caracterización de entrada y salida de cada proceso, agosto de 2020.*

Tabla 9. Informe de caracterización de entrada y salida de cada proceso, agosto de 2020.

1. AGUA CRUDA (ENTRADA)				
2. AGUA SALIDA TANQUE DE OXIDACION				
3. AGUA SALIDA FILTROS				
4. AGUA SUAVISADORES				
5. AGUA TANQUE RECUPERACION				
Datos de Entrada - Salida				
Componente	Proceso	Cantidad	Unidades	
Caudal	Entrada	85,58	m³/h	
	Salida	116,321		
Temperatura	1	46,830	°C	
	2	35,064		
	3	35,387		
	4	34,713		
	5	34,059		
pH	1	7,4672	Unidades de pH	
	2	7,9348		
	3	7,5803		
	4	7,5624		
	5	9,8532		
Color	1	2996,327	Unidades platino-cobalto	
	2	3150,393		
	3	341,375		
	4	171,483		
	5	146,948		
Conductividad	1	3454,745	µS	
	2	3666,313		
	3	3567,059		
	4	3446,315		
	5	2668,703		
Turbiedad	1	391,825	NTU	
	2	384,833		
	3	40,296		
	4	17,136		
	5	15,107		
pH	Entrada	10,906	Unidades de pH	Planta neutralizadora
	Salida	7,250		
	Caudal	27,916		
Coagulante	-	49	%	NaOH

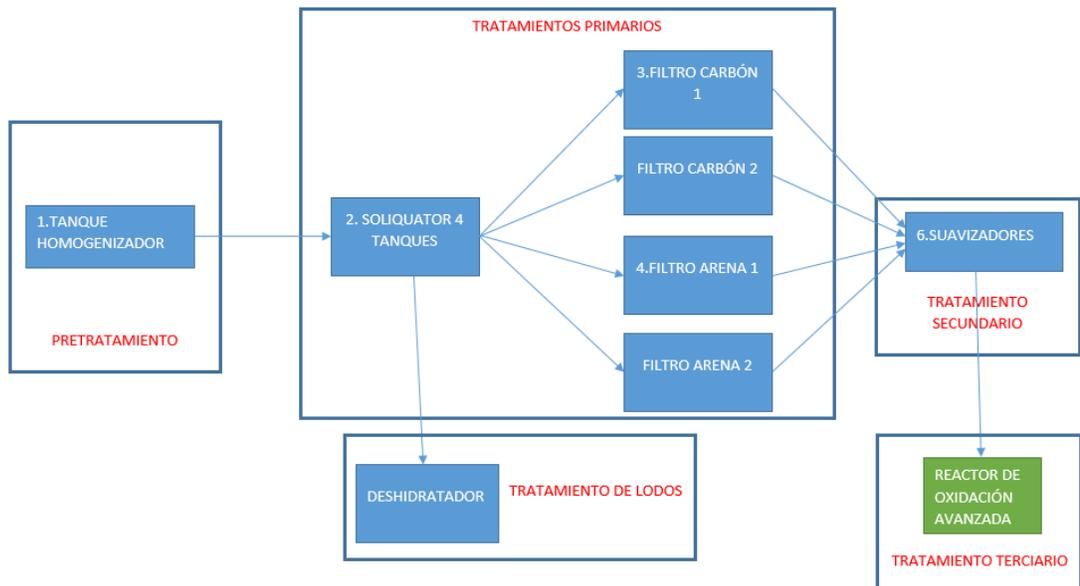
Fuente: Empresa textil

8.3.2. Uso de la información suministrada

Con la información recibida de los datos de caracterización de agua residual de salida ya tratada, se hace un balance de masa para obtener resultados iniciales y poder adicionar los datos al software GaBi Education. Se tomó la decisión de hacer los diferentes cálculos para la obtención de datos y en consiguiente, simular en el software. Se debe tener en cuenta, que la información de la *Tabla 9. Informe de caracterización de entrada y salida de cada proceso, agosto de 2020.*, se tiene como referencia, pero no se empleó para los cálculos, ya que solo nos brindaba algunos parámetros físicos y químicos del agua.

El flujo del sistema se encuentra en la *Figura 17. Flujo del proceso en la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la compañía colombiana.*, el cual fue el punto de partida y a continuación se muestra el escenario estudiado para la identificación y contextualización al proyecto.

Figura 19. Tipos de tratamientos encontrados en la PTAR de la empresa colombiana.



Fuente: Los autores.

Dentro de la identificación de los diferentes tipos de procedimientos encontrados en la empresa, se evidencian el pretratamiento (tanque homogenizador), tratamientos primarios (tanques de Soliquator y filtros), un tratamiento de los residuos generados en este caso los lodos (deshidratador), tratamiento secundario (suavizador o proceso de ablandamiento). Por lo tanto, con cada estructura se buscó una

adecuada ubicación de los diferentes procesos que desintegran cada parámetro o componente fisicoquímico y biológico, teniendo en cuenta las características de los procesos.

Tabla 10. Relación de datos de salida y proceso existente de la empresa.

DATOS DE SALIDA			PROCESOS QUE TRATAN LOS COMPONENTES	
Componente	Cantidad	Unidades		
Acidez	5	mg/L	Ablandamiento	
Alcalinidad	585	mg/L CaCO ₃	Ablandamiento	
AOX	0,1		Filtro de carbón	
BTEX	0,01	mg/L		
Cadmio	0,002	mg/L	Filtro de carbón	
Cinc Zn	0,027	mg/L		
Cobalto Co	0,01	mg/L		
Cobre (Cu)	0,026	mg/L	Filtro de carbón	
Color real - longitud de onda	1,14	-	Filtro de arena	
Color real	0,52	-		
Color real	0,4	-		
Cloruro	283,32	mg/L	Ablandamiento	Filtro de carbón
Cromo	0,011	mg/L	Filtro de carbón	
DBO 5	86	mg/L O ₂	Soliquator	
DQO	306	mg/L O ₂	Soliquator	
Dureza Cálcica	19,5	mg/L CaCO ₃	Ablandamiento	
Dureza total	32	mg/L CaCO ₃	Ablandamiento	
Fenoles totales	0,11	mg/L	Filtro de carbón	
Fósforo total	1,279	mg/L	Soliquator	
Grasas y Aceites	13	mg/L		
Hidrocarburos Aromáticos	0,005	mg/L		
Hidrocarburos Totales	5,75	mg/L		
Nitratos	1	mg/L	Filtro de carbón	
Nitrógeno Amoniacal	5	mg/L	Soliquator	
Nitrógeno total	10	mg/L		
Níquel	0,019	mg/L	Filtro de carbón	
Ortofosfatos	1,5	mg/L		
Sólidos suspendidos	27	mg/L	Filtro de carbón	Soliquator
Sulfatos	142,998	mg/L	Ablandamiento	
Sustancias activas de azul de metileno	0,56	mg/L	Filtro arena	
Sólidos sedimentables	0,8	ml/L-h	Soliquator	

Fuente: Los autores.

8.3.3. Cálculos de balance de masa y energía

8.3.3.1. Cálculo balance de masa

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Acumulación} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Entrada} \\ \text{por los límites} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Salida por los} \\ \text{límites del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Reacción} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} \quad (5)$$

El balance de masa se define como la contabilidad de entradas y salidas de masa en un proceso. La ecuación anterior, describe la aplicación de la ley de conservación de la masa que expresa “La masa no se crea ni se destruye, se transforma”. Este estudio es importante para el cálculo del tamaño de los equipos de un proceso, para evaluar la viabilidad de datos. Por lo general es un requisito previo para todos los demás cálculos (Deiana, Granados y Sardella 2018). Se dice que el sistema que se maneja en el presente trabajo es abierto, ya que el sistema de la empresa descarga agua a un cuerpo receptor.

Una vez estudiado el sistema, el sentido de flujo y la clasificación en cuanto a tratamientos de este, se hizo la consulta de las diferentes funciones de cada uno de los procesos encontrados con sus respectivos porcentajes de remoción. Para el cálculo de balance de masa, al contar con datos completos de salida del agua de la PTAR del año 2018, suministrados por la empresa, y teniendo en cuenta que se hace el cálculo para llegar a los datos de entrada, se partió de las siguientes hipótesis:

- Referencia bibliografía del porcentaje de remoción de cada proceso implementado:

Tanque de homogenización: La finalidad del sistema es mezclar unificar, homogenizar y estabilizar los componentes salientes del proceso de producción de la industria, para una adecuada entrada a los diferentes procesos de tratamientos. En este proceso no se encuentran hallazgos relevantes para la remoción de algún componente en el agua.

Soliquator: Es un sistema que tiene en la unión de los procesos de coagulación, floculación, clarificación o sedimentación y espesamiento de lodos. Éste proceso separa sólido-líquido, recicla los líquidos tratados y hace concentración de lodos. (Un Water 2017)

Deshidratador: También conocido como lecho de secado, el proceso de lechos de secado es uno de los procesos con mayor antigüedad, lo cual lo hace práctico y sencillo en su realización. En este proceso se usan lechos rectangulares de poca profundidad, que a su vez posean fondos porosos. La pasta que se obtiene se seca, provocando que se agriete y permita una evaporación mayor para liberar el agua de lluvia de la superficie. La deshidratación se logra gracias al drenaje de las capas inferiores y a la evaporación de la superficie bajo la acción del sol y el viento.(QuimiNet 2011)

Filtro de carbón: Estos filtros son utilizados para el tratamiento de agua en la descontaminación de metales pesados presentes en agua de río y en la eliminación de microorganismos coliformes (Silupú et al. 2017).

Filtro de arena: La filtración lenta en arena (FLA) como etapa principal de tratamiento, juega un papel muy importante en el mejoramiento de la calidad del agua en zonas rurales y urbanas marginadas, por su eficacia, facilidad de diseño y sencillez en su operación y mantenimiento. (Avila Bareño y Moreno Figueroa 2016)

Suavizador o sistema de ablandamiento: La empresa usa suavizadores que contienen resinas para tratar el agua, disminuyéndole la dureza. Son usados frecuentemente en diferentes industrias, ya que la dureza del agua puede causar serios problemas de mantenimiento. La resina de los suavizadores debe ser regenerada con salmuera, ya que el proceso por el cual funcionan los suavizadores es por intercambio iónico, intercambiando sodio por calcio y magnesio (Solis Vázquez-Mellado et al. 2017). Para el cálculo de la alcalinidad en el balance de masa en este sistema en el proyecto, se apoya del libro 'Purificación de Agua de Lopato y Villegas (2007)'.

- Simulación del proceso de la planta de tratamiento con el programa GPS-X 7.0.1.

En cuanto a los datos de balance de masa de la empresa, solo se contaba con dos caracterizaciones de la empresa textil. Una caracterización que corresponde a la entrada y salida de cada proceso de la planta de tratamiento residual interna implementada por la empresa, con datos de los siguientes parámetros físicos como (temperatura, color y turbiedad), químicos (conductividad y pH) del año 2020 del mes de agosto. Y otra caracterización con datos de salida del agua residual más completa del año 2018, pues este informe contaba con datos generales de: pH,

temperatura, DBO₅, DQO, sólidos suspendidos totales, grasas y aceites, también con datos de hidrocarburos, de metales, compuesto de fósforo y nitrógeno.

Por lo tanto, al contarse solo con datos de salida del año 2018 más completos se empleó el programa GPS-X 7.0.1, con el fin de realizar el cálculo de balance de masa de cada proceso implementado en la planta de tratamiento de agua residual interno por la empresa textil, lo que se quiso con este programa fue modelar cada proceso de la PTAR y variar los datos iniciales de la caracterización que pide el programa y en consiguiente, simular el programa con la información registrada. La simulación se hizo por 3 días con cada valor de entrada o de cada proceso, con proceso se hace referencia a los valores físicos y operacionales del filtro de carbón, ya que se evidenció que era el proceso que más variaba los valores de entrada ingresados. Esto se hizo hasta obtener los valores de salida brindada por la empresa, siendo un proceso iterativo hasta lograr tener valores próximos al informe del año 2018 de la compañía.

No obstante, se empleó una herramienta del programa que es el análisis de sensibilidad con la finalidad de realizar una interpretación de la gráficas por condición de operación de cada proceso más relevante, en este caso variables directamente relacionados como flujo, área superficial, en los filtros la superficie del lecho filtrante, para poder evitar que el proceso no tenga varios ciclos iterativos y poder simular y obtener valores similares a los ofrecidos por la empresa textil en la caracterización del año 2018. Finalmente, al contar con los resultados de balance de masa del programa GPS-X 7.0.1, se procede al software GaBi Education, colocando los valores de balance de masa respectivo de cada proceso implementado en la planta y poder obtener un análisis de ciclo de vida más completo del proceso de tratamiento de agua residual.

8.3.3.2. Cálculo de balance de energía

El balance de energía fue necesario para la modelación en el programa GaBi Education, junto con el balance de masa. Sin embargo, para el balance de energía se realizó primero un esquema en planta con la distribución de los diferentes procesos empleados por la empresa en AutoCAD; esto se hizo con el área total de la PTAR brindada por la empresa. Con el esquema hecho se comenzó a calcular las dimensiones de cada reactor, ya que se contaba con valores como volumen y otras variables asumidas, para llegar a los valores de las diferentes dimensiones de

cada reactor: tanque homogenización, soliquator, filtro carbón, filtro de arena y suavizadores.

Ya teniendo en cuenta la distribución requerida en la PTAR, se supuso que el funcionamiento de esta es a partir de un sistema pasivo impulsado con bombas, por lo que se procedió al cálculo hidráulico de la planta, esto con el fin de saber la altura a superar que requiere tener el equipo de bombeo: la altura a superar depende de la pérdida por fricción, pérdida por accesorios, la longitud horizontal, longitud vertical y una altura estática. Esto con el fin de poder buscar el equipo necesario para la circulación del agua residual textil proceso a proceso. Para esta búsqueda lo que se requirió fue el caudal de bombeo, altura dinámica total (que es la altura que debe superar la bomba) para que, a partir de los datos del catálogo del fabricante, se obtenga la potencia en caballos de potencia y la cantidad de bombas requeridas para suplir con la demanda establecida en la planta de tratamiento residual de la industria textil y así mismo conocer la energía que requiere la planta para su funcionamiento.

8.4. OBJETIVO Y ALCANCE DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Como objetivo se realizó un análisis detallado del tratamiento de agua residual empleado por la empresa textil en estudio, con el fin de identificar sus principales variables que afectan directamente el ciclo de vida. Igualmente, para el alcance del estudio se especificó el producto a estudiar por medio de la unidad funcional, los límites del sistema y las categorías de impacto seleccionados para la correspondiente evaluación del tratamiento.

8.4.1. Unidad funcional

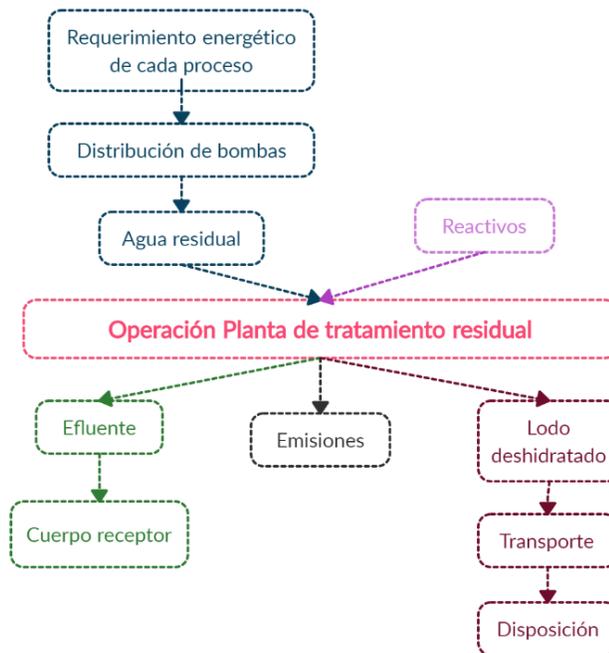
En cuanto a la unidad funcional el análisis correspondió al caudal de entrada del agua utilizada por la empresa. Por lo tanto, todos los componentes encontrados en la caracterización del agua y consumo de energía están en referencia a este volumen de agua. No obstante, se decidió esta unidad funcional para facilitar la difusión de los resultados y su comparación, ya que el volumen puede ser obtenido, para un tiempo determinado, a partir del flujo.

8.4.2. Límites sistema

El estudio abarca la etapa de tratamiento de agua residual de operación en una industria textil, en donde se considera las emisiones de los respectivos procesos implementados en la industria, al igual que el suministro energético.

En la *Figura 20. Límites del sistema.*, se ilustra los límites del sistema, donde se estudia directamente la fase de operación que comprende cada proceso implementado para la remoción de los diferentes contaminantes producidos, y también se considera las emisiones de los respectivos mecanismos. La empresa destaca que tienen menores porcentajes de vertimientos por la economía circular que manejan, pero vierten agua a un cuerpo receptor; el empleo de la economía circular da lugar a que, les dan un reúso a las aguas, ya sea para el mismo proceso de teñido o para procesos internos en la compañía. Mediante el informe obtenido por la industria textil se tiene la siguiente información acerca de los procesos de tratamiento y los diferentes componentes que producen en cada uno de estos.

Figura 20. Límites del sistema.



Fuente: Los autores.

8.4.3. Categorías de impacto

Para las categorías de impacto, se hace investigaciones sobre las diferentes categorías de impacto encontradas en la tesis del PhD. Bolívar (2018) en la Universidad Javeriana en Colombia y una tesis en México de Investigación y Alvarado Diaz (2013) presentadas a continuación en la *Tabla 11. Categorías de impactos ambientales.*

Tabla 11. Categorías de impactos ambientales.

CATEGORÍAS DE IMPACTO	UNIDADES	CATEGORÍA DE DAÑO FINAL	DEFINICIÓN
Calentamiento global.	kg CO ₂ - Eq.	Cambio climático	Definido como el impacto de las emisiones humanas de los gases de efecto invernadero.
Agotamiento del ozono atmosférico.	kg CFC 11 - Eq.	Salud Humana	Formación de compuestos químicos reactivos tales que propiciarían la destrucción de la capa de ozono.
Acidificación del suelo.	kg SO ₂ - Eq.	Calidad del ecosistema	Contaminación acidificante. Procesos que incrementan la acidez de los sistemas del suelo mediante concentración de iones de hidrógeno.
Eutrofización del suelo.	Mol de N - Eq.	Calidad del ecosistema	Cubre todos los impactos de los excesos niveles de macronutrientes del suelo.
Eutrofización de cuerpos de agua.	kg PO ₄ ⁻³ - Eq.	Calidad del ecosistema	Cubre todos los potenciales impactos en el ambiente por los niveles excesivos de macronutrientes.
Formación de smog fotoquímico.	kg de NMVOC., kg C ₂ H ₄ - Eq.	Salud humana y calidad del ecosistema	Es la formación de compuesto químicos reactivos tales como el ozono por la acción de la luz sobre ciertos contaminantes primarios en el aire.
Efectos en la salud humana.	CTUh.	Salud humana	Abarca los impactos sobre la salud humana de sustancias tóxicas presentes en el ambiente.
Agotamiento del consumo de agua.	m ³	Recursos	Factor que representa el gasto del agua fresca.
Formación de material particular.	kg PM 10 - Eq.	Calidad del ecosistema	Es la suma de la formación de todos los materiales particulados sólidos y líquidos en el aire los cuales son peligrosos.
Acidificación Total.	Mol de H ⁺ - Eq.	Calidad del ecosistema	Es expresado como el relativo efecto de acidificación que los iones hidrogeniones producidos.
Energía no renovable	MJ	Recursos y cambio climático	Petróleo, uranio, gas natural, carbón, energía nuclear, turba, carbón.

Continuación tabla 11. Categorías de impactos ambientales.

CATEGORÍAS DE IMPACTO	UNIDADES	CATEGORÍA DE DAÑO FINAL	DEFINICIÓN
Toxicidad humana (Carcinogénicos).	kg C ₂ H ₃ Cl - Eq.	Salud Humana	Representa los efectos en la salud humana, excepto efectos respiratorios. Trata lo concerniente al transporte en el
Toxicidad humana (No carcinogénicos).	kg C ₂ H ₃ Cl - Eq.	Salud Humana	medio ambiente, la exposición y la ingesta resultante de las sustancias químicas.
Respiratorios orgánicos.	PM 2,5 - Eq.	Salud humana y calidad del ecosistema	(Extremadamente peligrosos) benceno, cloruro de vinilo y 1,2 dicloroetano, los que pueden causar daños significativos al medio ambiente (Clase A) acetaldehído, anilina, tricloroetileno, y los de menor impacto (Clase B) acetona y etanol.
Respiratorios inorgánicos.	PM 2,5 - Eq.	Salud humana	Algunos compuestos reportados como causantes de efectos respiratorios son: materia particulada (PM10 y PM 2.5), nitratos y sulfatos, óxidos de azufre, ozono, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y compuestos volátiles orgánicos VOCs.
Ecotoxicidad terrestre.	kg TEG -Eq.	Calidad del ecosistema	Corresponde a las sustancias químicas que impactan los ecosistemas terrestres
Combustibles fósiles.	kg oil - Eq.	Calidad del ecosistema	Cantidad de fósiles extraídos, basado en su calor de combustión.
Radiación ionizante.	Bq C-14 -Eq.	Salud humana	Resultado de la radiación radioactiva como las emisiones de sustancias radiactivas y de la exposición directa a la radiación.
Radiación no ionizante.	Bq C-14 -Eq.	Salud humana	Es de baja energía que no tiene suficiente energía para eliminar un electrón de un átomo. Esta radiación incluye la luz visible, infrarroja y ultravioleta; los microondas; las ondas de radio y la energía de radiofrecuencia de los teléfonos móviles.
Ocupación del suelo	m ² *año - Eq.	Calidad del ecosistema	Refleja el daño a los ecosistemas, producto de los efectos de la ocupación y transformación del suelo.
Ecotoxicidad acuática	kg TEG -Eq.	Calidad del ecosistema	Corresponde a las sustancias químicas que impactan los ecosistemas acuáticos
Acidificación del agua	kg SO ₂ - Eq.	Calidad del ecosistema	Procesos que incrementan la acidez de los sistemas de agua mediante concentración de iones de hidrógeno
Extracción de minerales o agotamiento de recursos naturales	MJ surplus	Recursos	Corresponde a la disminución de la disponibilidad de la reserva total de las funciones potenciales de los recursos naturales, debido a una tasa de extracción y uso, superior a la de su regeneración.

Fuente: Los autores.

8.4.4. Modificación con el Proceso de Oxidación Avanzada

Como bien se mostró, la empresa hace un estudio para la caracterización del agua, donde se hace la comparativa con la norma de vertimientos, y efectivamente cumple con los valores mínimos. Por esta razón, se hace una comparación del sistema convencional de tratamiento de aguas residuales que la empresa textil maneja, reemplazando algún proceso ya existente en el sistema, por un Proceso de Oxidación Avanzada, para identificar los beneficios o el mejoramiento que el sistema puede traer con el valor agregado de estas nuevas tecnologías; para esto, se simula en GPS-X 7.0.1 el sistema con el proceso de oxidación avanzada, identificando la importancia, beneficios y eficiencias que este proceso lleva al sistema de tratamiento de aguas residuales de la industria textil.

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1. CÁLCULO DE BALANCE DE MASA

Para la primera hipótesis del balance de masa, con los datos de salida que suministra la empresa se tiene *la Tabla 10. Relación de datos de salida y proceso existente de la empresa.*, ya mencionada, donde se identifica los componentes con relación a cada proceso que lo remueve encontrado en el sistema. Para los cálculos se toman las siguientes ecuaciones:

$$CONCENTRACIÓN INICIAL = \frac{\text{Concentración de componente en la salida del proceso}}{1 - \frac{\% \text{ remoción}}{100}} \quad (6)$$

$$CARGA MÁSICA = CAUDAL * CONCENTRACIÓN \quad (7)$$

Con esto, se realizaron los cálculos desde la salida del sistema hasta el inicio de la deposición en la planta de tratamiento de agua residual de la empresa textil (se hace calculo inverso ya que solo se contaban con los valores de salida). La carga másica queda en unidades de [g/h] para todos los procesos. A continuación, se especifican los resultados de las concentraciones y flujos de masa calculados que entran y salen en cada proceso:

➤ Ablandamiento- Suavizadores

En la salida se tienen los siguientes datos:

Tabla 12. Componentes en la Salida del proceso de ablandamiento.

Sale		
Alcalinidad	585	mg/L CaCO ₃
Dureza Cálcica	19,5	mg/L CaCO ₃
Dureza total	32	mg/L CaCO ₃

Fuente: Los autores

Tabla 13. Cálculos para la alcalinidad.

Coagulantes	Factor			Cantidad suministrada (mg/L)	Alcalinidad consumida		
Sulfato de aluminio	0,51	0,45	0,24	800	408	360	192
Sulfato ferroso	0,36	0,13	-		288	104	-
Cloruro de aluminio	0,51	0,45	0,24		408	360	192
Cloruro férrico	0,93	0,56	0,38		744	448	304

Fuente: Los autores

Para el cálculo de la alcalinidad, se hace necesario conocer el tipo de coagulante y la cantidad que se suministra en el proceso de ablandamiento para la identificación de la alcalinidad que se consume. La empresa no proporciona información de la cantidad suministrada del coagulante así que se extrae de un informe de la Universidad Escuela de Administración, Finanzas y Tecnología (EAFIT) de Las Vegas, Medellín Colombia (Gilpavas et al. 2018), que mediante la prueba de jarras, mostró una dosis óptima de coagulante de alumbre $Al_2(SO_4)_3$ de 800 mg/L, obteniendo así diferentes valores de alcalinidad, pero se tomó el valor de alcalinidad consumida de 408 mg/L. Los factores encontrados en la *Tabla 13. Cálculos para la alcalinidad.*, se extraen de la *Tabla 14. Consumo de alcalinidad en las reacciones de coagulación.*

Tabla 14. Consumo de alcalinidad en las reacciones de coagulación.

Coagulante	Alcalinidad consumida	Consumo de alcalinidad, mg como $CaCO_3$ por mg de Dosis de coagulante como sustancia química.
Lima		
CaO	Ca $(HCO_3)_2$	$(100 \text{ mg / mmol}) \div (56 \text{ mg / mmol}) = 1,79$
	Mg $(HCO_3)_2$	$(100 \text{ mg / mmol}) \div (2 \times 56 \text{ mg / mmol}) = 0,89$
Ca $(OH)_2$	Ca $(HCO_3)_2$	$(100 \text{ mg / mmol}) \div (74 \text{ mg / mmol}) = 1,35$
	Mg $(HCO_3)_2$	$(100 \text{ mg / mmol}) \div (2 \times 74 \text{ mg / mmol}) = 0,68$
Alumbre		
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$	Ca $(HCO_3)_2$	$(3 \times 100 \text{ mg / mmol}) \div (594 \text{ mg / mmol}) = 0,51$
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$	Ca $(HCO_3)_2$	$(3 \times 100 \text{ mg / mmol}) \div (666 \text{ mg / mmol}) = 0,45$
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 49,6 H_2O$	Ca $(HCO_3)_2$	$(3 \times 100 \text{ mg / mmol}) \div (1236 \text{ mg / mmol}) = 0,24$
Cloruro férrico		
$FeCl_3$	Ca $(HCO_3)_2$	$(3 \times 100 \text{ mg / mmol}) \div (2 \times 162 \text{ mg / mmol}) = 0,93$
$FeCl_3 \cdot 6 H_2O$	Ca $(HCO_3)_2$	$(3 \times 100 \text{ mg / mmol}) \div (2 \times 270 \text{ mg / mmol}) = 0,56$

Continuación tabla 14. Consumo de alcalinidad en las reacciones de coagulación.

Coagulante	Alcalinidad consumida	Consumo de alcalinidad, mg como CaCO ₃ por mg de Dosis de coagulante como sustancia química.
FeCl ₃ *13,1 H ₂ O	Ca (HCO ₃) ₂	$(3 \times 100 \text{ mg / mmol}) \div (2 \times 398 \text{ mg / mmol}) = 0,38$
Sulfato férrico		
Fe ₂ (SO ₄) ₃	Ca (HCO ₃) ₂	$(3 \times 100 \text{ mg / mmol}) \div (400 \text{ mg / mmol}) = 0,75$
Fe ₂ (SO ₄) ₃ * 9H ₂ O	Ca (HCO ₃) ₂	$(3 \times 100 \text{ mg / mmol}) \div (562 \text{ mg / mmol}) = 0,53$
Fe ₂ (SO ₄) ₃ * 30,1H ₂ O	Ca (HCO ₃) ₂	$(3 \times 100 \text{ mg / mmol}) \div (940 \text{ mg / mmol}) = 0,32$
Cloruro ferroso		
FeCl ₂ *4H ₂ O	Ca (HCO ₃) ₂	$(100 \text{ mg / mmol}) \div (199 \text{ mg / mmol}) = 0,50$
FeCl ₂ *12H ₂ O	Ca (HCO ₃) ₂	$(100 \text{ mg / mmol}) \div (343 \text{ mg / mmol}) = 0,29$
Sulfato de hierro		
FeSO ₄ *7H ₂ O	Ca (HCO ₃) ₂	$(100 \text{ mg / mmol}) \div (278 \text{ mg / mmol}) = 0,36$
FeSO ₄ *36H ₂ O	Ca (HCO ₃) ₂	$(100 \text{ mg / mmol}) \div (800 \text{ mg / mmol}) = 0,13$

Fuente: Modificada de: QASIM, S.R. y ZHU, G., 2017. Wastewater treatment and reuse: Theory and design examples: Volume 1: Principles and basic treatment. S.l.: s.n. ISBN 9781351402026.

Tabla 15. Resultado de balance de la entrada y salida del proceso de ablandamiento (suavizadores).

COMPONENTES	ENTRA		SALE		% SALIDA
	Cantidad	Carga másica (g/h)	Cantidad	Carga másica (g/h)	
Dureza Cálrica (mg/L CaCO ₃)	33,621	2874,428	19,5	1667,168	58%
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	58,097	4967,077	32	2735,866	55,08%
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	993	84897,336	585	50015,047	-

Fuente: Los autores

Con la siguiente ecuación:

$$\text{Alcalinidad inicial} = \text{Alcalinidad final} + \text{Alcalinidad consumida} \quad (8)$$

Da como resultado la alcalinidad inicial de 993 mg/L. Para los porcentajes de remoción encontrados en la *Tabla 15. Resultado de balance de la entrada y salida del proceso de ablandamiento (suavizadores)*., se usó la tesis de Arequipa Perú de Cansaya Quispe y Nabenta Aguilar (2018), donde se identificaron los porcentajes con los resultados de los diferentes laboratorios desarrollados en la tesis para la dureza cálcica y dureza total.

➤ Filtro de carbón

Tabla 16. Resultado de balance de la entrada y salida del proceso del filtro de carbón.

COMPONENTE	ENTRA		SALE		% Remoción
	Cantidad	Carga másica (g/h)	Cantidad	Carga másica (g/h)	
Cadmio (mg/L)	0,0027	0,2311	0,002	0,171	26%
Cinc Zn (mg/L)	0,0365	3,1194	0,027	2,308	26%
Cobre (Cu) (mg/L)	0,0351	3,0039	0,026	2,223	26%
Cromo (mg/L)	0,0149	1,2709	0,011	0,940	26%
Níquel (mg/L)	0,3800	32,4884	0,019	1,624	95%
Nitratos (mg/L)	3,33	284,9860	1	85,496	70%
Fenoles totales (mg/L)	0,1486	12,709	0,11	9,405	26%
Sólidos suspendidos (mg/L)	675	57709,7	27	2308,387	96%
Cloruro (mg/L)	47220	4037111,99	472,2	40371,120	99%

Fuente: Los autores

Para los cálculos del filtro de carbón reflejados en la *Tabla 16. Resultado de balance de la entrada y salida del proceso del filtro de carbón.*, se emplearon diferentes porcentajes de remoción que fueron tomados de la investigación “deshidratación y secado lodo”, que determina porcentajes de remoción de metales como cadmio, cinc, cobre, cromo y níquel (Silupú et al. 2017), y para la parte de cloruro del 99% se sacó de la referencia. (Terra Ecología práctica 2005)

➤ Lecho de secado - Deshidratador

Tabla 17. Resultado de balance de la entrada y salida del proceso del deshidratador.

COMPONENTE	ENTRA		SALE	
	Cantidad (L/s)	Carga másica (g/h)	Cantidad (L/s)	Carga másica (g/h)
Agua	85,49580674	7309,53297	116,3208255	9944,942816

Fuente: Los autores

El respectivo procedimiento realizado se refleja en la *Tabla 17. Resultado de balance de la entrada y salida del proceso del deshidratador.* con sus valores, el único análisis o calculo fue revisar la principal función del deshidratador, que como su nombre lo dice se encarga de eliminar el contenido de humedad, para los lechos de secado la proporción de agua eliminada por este mecanismo esta entre el 20 – 55 % («Deshidratación y secado de lodos.» 2017), del cual para el cálculo se tomó el 26,5% de remoción, con el fin de que cuadraran los valores finales enviados por la empresa textil.

➤ Filtro Arena

Tabla 18. Resultado de balance de la entrada y salida del proceso del filtro de arena.

COMPONENTE	ENTRA		SALE	
	Cantidad	Carga másica (g/h)	Cantidad	Carga másica (g/h)
Color real	2,85	243,6630492	1,14	97,46521968

Fuente: Los autores

En consecuencia a los cálculos de la *Tabla 18. Resultado de balance de la entrada y salida del proceso del filtro de arena.*, en la parte de filtro de arena el parámetro que se tuvo en cuenta es el color real, el cual se remueve hasta en un 60% con ayuda de pre oxidación (Avila Bareño y Moreno Figueroa 2016). Para el cual se tomó el valor total del 60% de remoción en el respectivo cálculo.

➤ Soliquator

Tabla 19. Resultado de balance de entrada y salida del proceso soliquator.

COMPONENTE	Entra		Sale		% remoción
	Cantidad	Carga másica (g/h)	Cantidad	Carga másica (g/h)	
DBO Total (mg/L)	286,667	24532,933	86	7359,880	70%
DQO Total (mg/L)	1020,000	87291,600	306	26187,480	70%
Nitrogeno (mg/L)	76,923	6583,077	10	855,800	87%
Fósforo (mg/L)	5,329	456,070	1,279	109,457	76%
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	964,286	82523,571	675	57766,500	30%

Fuente: Los autores

Relacionado con la *Tabla 19. Resultado de balance de entrada y salida del proceso soliquator.*, se entiende que este proceso reúne varios procesos, así que, se toman los porcentajes de la Tabla 6.8 del libro 'Wastewater treatment and reuse: Theory and design examples: Volume 1: Principles and basic treatment de Qasim y Zhu (2017), estos valores de porcentaje de remoción están consignados en la *Tabla 20. Porcentajes de remoción para el proceso de Soliquator.*

Tabla 20. Porcentajes de remoción para el proceso de Soliquator.

Unidad	Operación y proceso de la unidad	Aplicación principal	Eliminación lograda %
C	Clarificador primario (o sedimentación).	El objetivo principal de la sedimentación primaria es eliminar los sólidos orgánicos e inorgánicos flotables y sedimentables. Las cribas ⁹ finas también se utilizan en lugar del clarificador primario, especialmente antes de un proceso de biorreactor de membrana (MBR).	DBO ₅ y DQO = 20-40 TSS = 50-70 TP = 10-20 ON = 20-30 AN = 0
D	Coagulación y precipitación química.	La coagulación y la precipitación química implican la adición de productos químicos y una mezcla rápida (RM) o dispersión, seguida de floculación (FLOC) y sedimentación. El proceso se utiliza para mejorar la eliminación de TSS, BOD ₅ y TP. Los productos químicos comúnmente utilizados son alumbre, sales de hierro, polímeros y cal en una o dos etapas.	DBO ₅ y DQO = 40-70 TSS = 50-80 TP = 70-90 ON = 70-95 AN = 0

Fuente: Modificada de; QASIM, S.R. y ZHU, G., 2017. Wastewater treatment and reuse: Theory and design examples: Volume 1: Principles and basic treatment. S.l.: s.n. ISBN 9781351402026.

Finalmente, para la parte de la primera hipótesis de los componentes del tratamiento de agua en la industria textil, teniendo en cuenta los porcentajes de remoción de referencias bibliográficas, dan como resultado la *Tabla 21. Resultado final de los componentes en la entrada del sistema:*

⁹ Las cribas son máquinas o equipos que se utilizan para la clasificación por tamaño de un producto a granel, esto se realiza de manera continua en un proceso que inicia en la zona de alimentación de la criba, la posterior separación de las fracciones por tamaño del material, y termina en el extremo final, donde salen las partículas rechazadas que denominamos sobre tamaño. (Myrsa Mulder 2017)

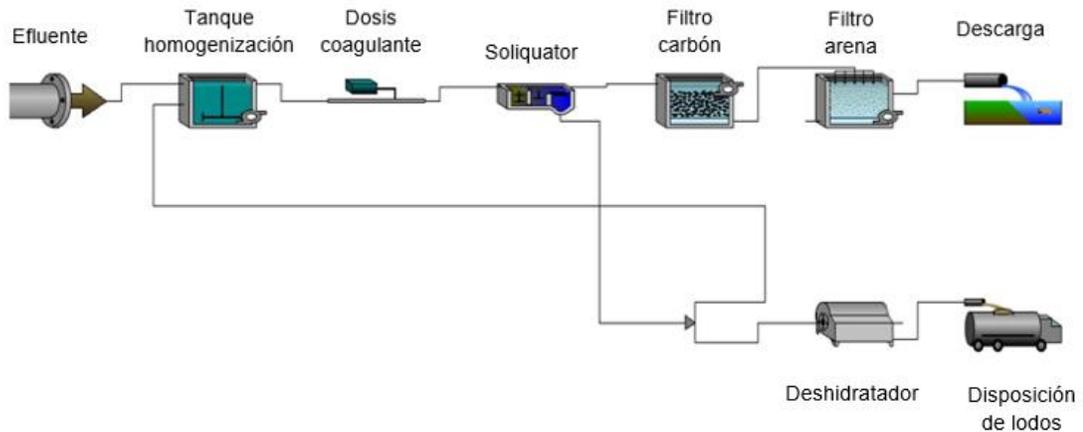
Tabla 21. Resultado final de los componentes en la entrada del sistema

DATOS DE ENTRADA		
PARÁMETRO	CANTIDAD	UNIDADES
Caudal	85,496	L/s
Alcalinidad	993	mg/L CaCO ₃
Cinc Zn	0,036	mg/L
Cobre (Cu)	0,035	mg/L
Color real - longitud de onda	2,85	-
Cloruro	47220	mg/L
DBO ₅	358,333	mg/L O ₂
DQO	637,5	mg/L O ₂
Fósforo total	15,790	mg/L
Nitratos	3,333	mg/L
Nitrógeno total	952,381	mg/L
Níquel	0,38	mg/L
Sólidos suspendidos	56250	mg/L

Fuente: Los autores.

Con los datos que se calcularon para la entrada de cada proceso con la primera hipótesis, se llenan los datos de caracterización del agua en el programa GPS-X y se obtienen los valores de entrada y salida de cada proceso (segunda hipótesis).

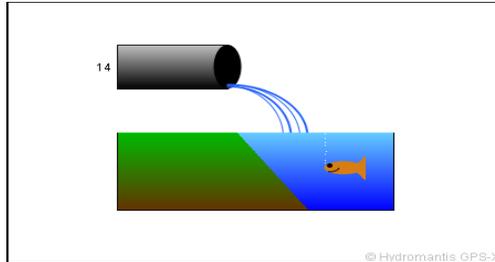
Figura 21. Esquema del sistema convencional PTAR industria textil.



Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

➤ Descarga

Figura 22. Descarga.



Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

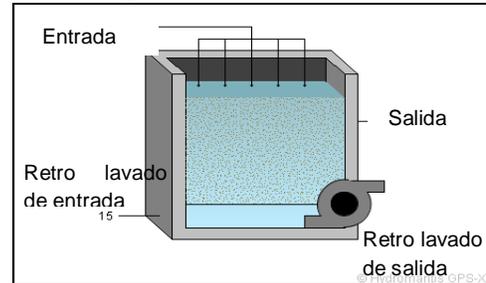
Tabla 22. Resultados de la descarga en GPS-X.

DESCARGA		
PARÁMETRO	ENTRADA	UNIDAD
Caudal	1997,485	m ³ /d
Sólidos Suspendidos Totales	26,92	mg/L
Sólidos Suspendidos Volátiles	3,17	mg/L
DBO ₅	84,83	mg/L
DQO	305,50	mg/L
Amoniac N	0,47	mgN/L
Nitrito N	0,00060005	mgN/L
Nitrato N	0,00073	mgN/L
Nitrógeno Total Aparente	10,065	mgN/L
Nitrógeno Total	10,066	mgN/L
Soluble PO ₄ -P	0,085	mgP/L
Fósforo Total	1,994	mgP/L
Alcalinidad	113,886	mgCaCO ₃ /L
pH	7	-

Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

➤ Filtro de Arena.

Figura 23. Filtro de Arena.



Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

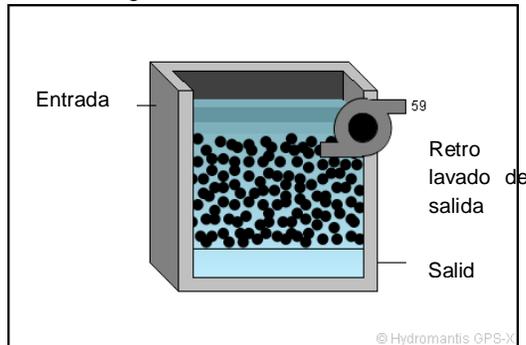
Tabla 23. Resultados del Filtro de Arena en GPS-X.

FILTRO DE ARENA			
PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA	UNIDAD
Caudal	2038,25	1997,485	m ³ /d
Sólidos Suspendidos Totales	131,92	26,92	mg/L
Sólidos Suspendidos Volátiles	15,55	3,17	mg/L
DBO ₅	87,67	84,83	mg/L
DQO	326,64	305,50	mg/L
Amoniac N	0,47	0,47	mgN/L
Nitrito N	0,00060	0,00060	mgN/L
Nitrato N	0,00073	0,00073	mgN/L
Nitrógeno Total Aparente	11,22	10,07	mgN/L
Nitrógeno Total	11,22	10,07	mgN/L
Soluble PO ₄ -P	0,08	0,08	mgP/L
Fósforo Total	2,31	1,99	mgP/L
Alcalinidad	113,89	113,89	mgCaCO ₃ /L
pH	7	7	-

Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

➤ Filtro de carbón

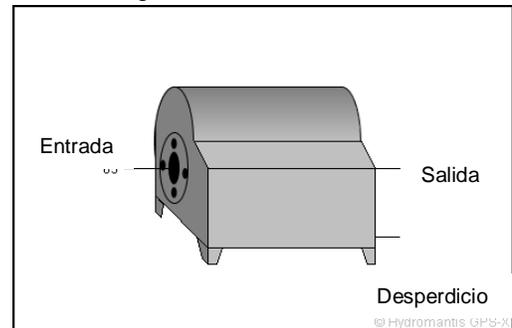
Figura 24. Filtro de carbón.



Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

➤ Deshidratador

Figura 25. Deshidratador.



Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

Tabla 24. Resultados del Filtro de carbón en GPS-X.

FILTRO DE CARBÓN				
PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA	RETROLAVADO	UNIDAD
Caudal	2063,25	2038,25	25	m ³ /d
Sólidos Suspendidos Totales	659,41	131,92	-	mg/L
Sólidos Suspendidos Volátiles	72,46	15,55	-	mg/L
DBO ₅	244,75	87,67	-	mg/L
DQO	629,00	326,64	-	mg/L
Amoniac N	2,0457E-09	0,474	-	mgN/L
Nitrito N	2,0457E-09	0,00060005	-	mgN/L
Nitrato N	3,3	0,00073	-	mgN/L
Nitrógeno Total Aparente	16,8724	11,220	-	mgN/L
Nitrógeno Total	20,172	11,221	-	mgN/L
Soluble PO ₄ -P	0,01	0,085	-	mgP/L
Fósforo Total	3,95	2,31	-	mgP/L
Alcalinidad	0,0061	113,886	-	mgCaCO ₃ /L
pH	7	7	-	-

Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

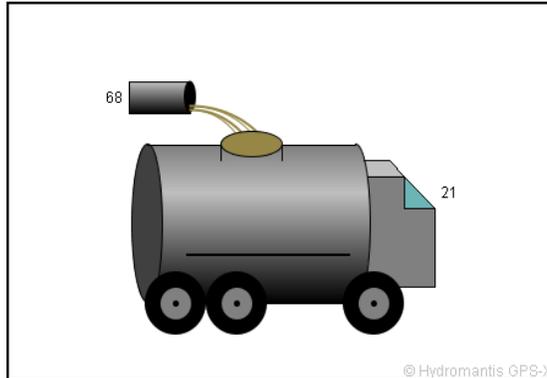
Tabla 25. Resultados del deshidratador en GPS-X.

DESHIDRATADOR				
PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA	DESPERDICIO	UNIDAD
Caudal	0,75	0,735	0,015	m ³ /d
Sólidos Suspendidos Totales	5480613,15	1700150,5	190723283,3	mg/L
DQO	1034979,27	382445,647	33009126,94	mg/L
Amoniac N	2,0457E-09	2,0457E-09	2,04573E-09	mgN/L
Soluble PO ₄ -P	0,01	0,01	0,01	mgP/L
Alcalinidad	0,00612	0,00612	0,00612	mgCaCO ₃ /L
pH	7	7	7	-

Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

➤ Eliminación de lodos

Figura 26. Eliminación de lodos.



Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

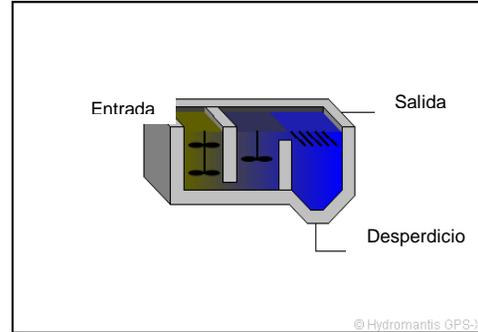
Tabla 26. Resultados de la eliminación de lodos.

ELIMINACIÓN DE LODOS		
PARÁMETRO	ENTRADA	UNIDAD
Caudal	0,015	m ³ /d
Sólidos Suspendedos Totales	190723283	mg/L
Sólidos Suspendedos Volátiles	18837355,3	mg/L
DBO ₅	2153714,51	mg/L
DQO	33009126,9	mg/L
Amoniaco N	2,0457E-09	mgN/L
Nitrito N	2,0457E-09	mgN/L
Nitrato N	3,3	mgN/L
Nitrógeno Total Aparente	1875927,13	mgN/L
Nitrógeno Total	1875930,43	mgN/L
Soluble PO ₄ -P	0,01	mgP/L
Fósforo Total	512766,296	mgP/L
Alcalinidad	0,00612	mgCaCO ₃ /L
pH	7	-

Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

➤ Soliquator

Figura 27. Soliquator.



Simulación programa GPS-X 7.0.1.

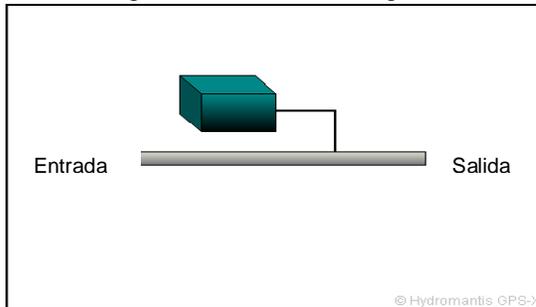
Tabla 27. Resultados del Soliquator del sistema en GPS-X

SOLIQUATOR				
PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA	DESPERDICIO	UNIDAD
Caudal	2064,75	2063,25	1,5	m ³ /d
Sólidos Suspendedos Totales	4640,49	659,41	5480613,15	mg/L
DQO	1380,44	629,001	1034979,27	mg/L
Amoniaco N	2,0457E-09	2,0457E-09	2,04573E-09	mgN/L
Soluble PO ₄ -P	0,01	0,01	0,01	mgP/L
Alcalinidad	0,00612	0,00612	0,00612	mgCaCO ₃ /L
pH	7	7	7	-

Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

➤ Dosis de coagulante

Figura 28. Dosis de coagulante.



Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

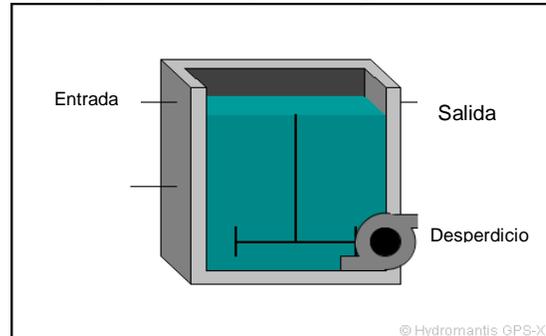
Tabla 28. Resultados de la dosis de coagulante.

DOSIS DE COAGULANTE			
PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA	UNIDAD
Caudal	2064,75	2064,75	m ³ /d
Dosis del metal	-	1651,8	kg/d
Concentración del metal	-	800	mg/L
Sólidos Suspendidos Totales	2203,48	4640,49	mg/L
Soluble PO ₄ -P	1,50	0,01	mgP/L
Fósforo Total	16,66	16,66	mgP/L
Alcalinidad	0,92	0,00612	mgCaCO ₃ /L
pH	7	7	-

Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

➤ Homogeneizador

Figura 29. Tanque homogenización.



Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

Tabla 29. Resultados del tanque de homogenización.

TANQUE DE HOMOGENIZACIÓN				
PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA	DESPERDICIO	UNIDAD
Caudal	2064	2064,75		m ³ /d
Sólidos Suspendidos Totales	211,10	2203,48	-	mg/L
Sólidos Suspendidos Volátiles	168,88	387,80	-	mg/L
DBO ₅	290,56	333,65	-	mg/L
DQO	1004,45	1380,4357	-	mg/L
Amoniaco N	0	2,05E-09	-	mgN/L
Nitrógeno Total Aparente	40,16	63,47	-	mgN/L
Fósforo Total	10,3	16,657	-	mgP/L
Alcalinidad	0,92	0,92	-	mgCaCO ₃ /L
pH	7	7	-	-

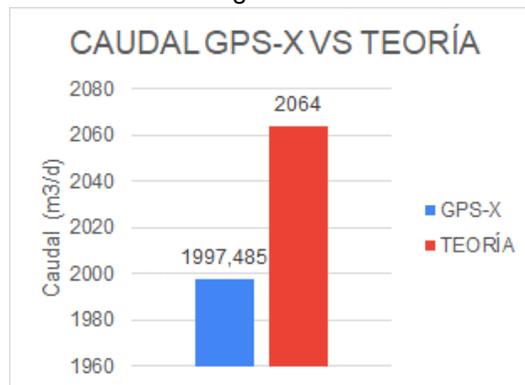
Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

9.2. COMPARATIVO DE LOS DATOS SUMISTRADOS POR LA EMPRESA CON LAS DOS HIPOTESIS PLANTEADAS

Teniendo los resultados de cada hipótesis, se analizan y se comparan mediante gráficas, con el fin de observar la relación de datos. En las gráficas se encuentra la comparación de los valores de las dos hipótesis planteadas inicialmente (no en todos los casos se hace dicha comparación, ya que no se cuenta con información que se relacionen entre sí con las dos hipótesis, así que se hacen también gráficas identificando la variación de valores dentro del GPS-X o la variación en cuanto a la teoría); en contexto la primer hipótesis que hace referencia a cálculos basados en otras investigaciones de la remoción de cada componente y la segunda hipótesis con valores generados por el programa GPS-X 7.0.1.

➤ Descarga

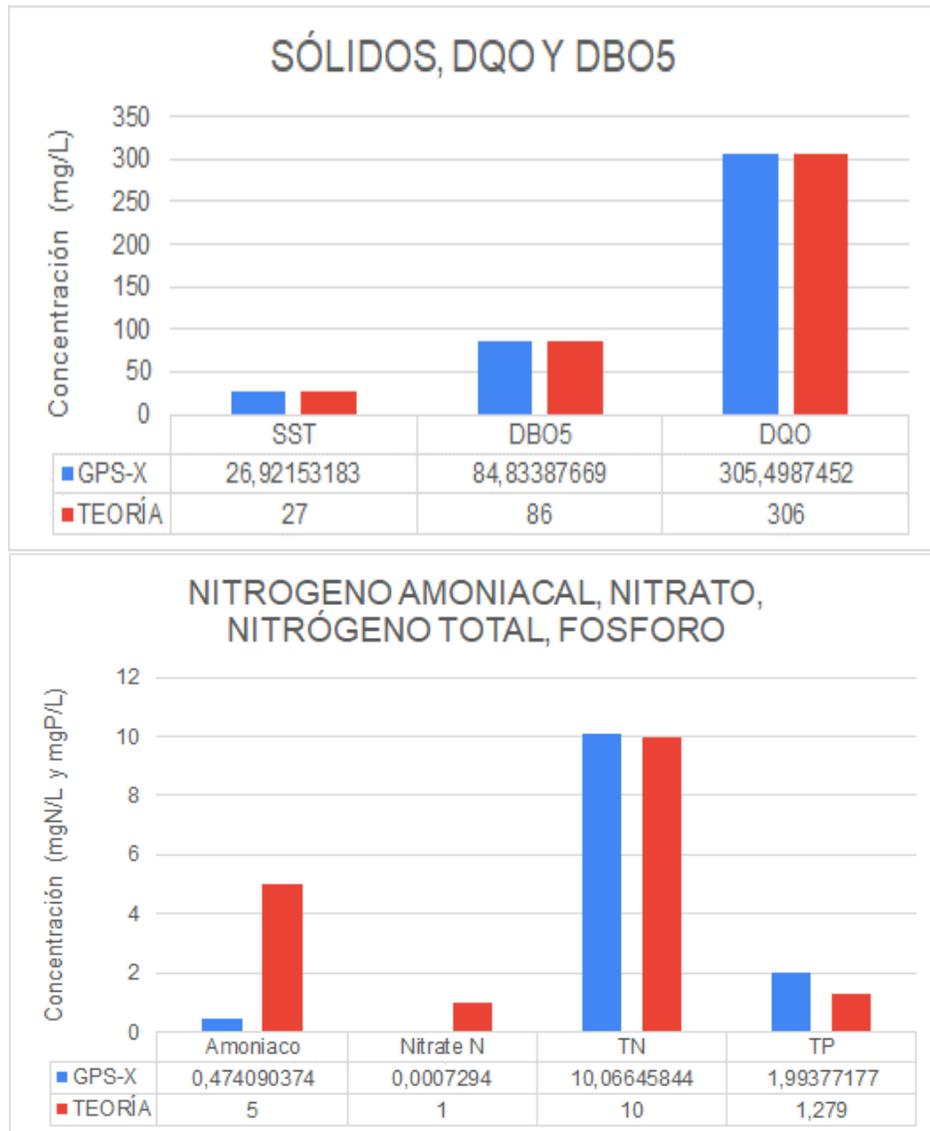
Gráfica 1. Caudales en la descarga del sistema - Teoría vs GPS-X 7.0.1.



Fuente: Los autores.

En la gráfica anterior, se muestra la comparación entre la descarga entre la primera y segunda hipótesis, con una diferencia no muy grande entre los dos caudales.

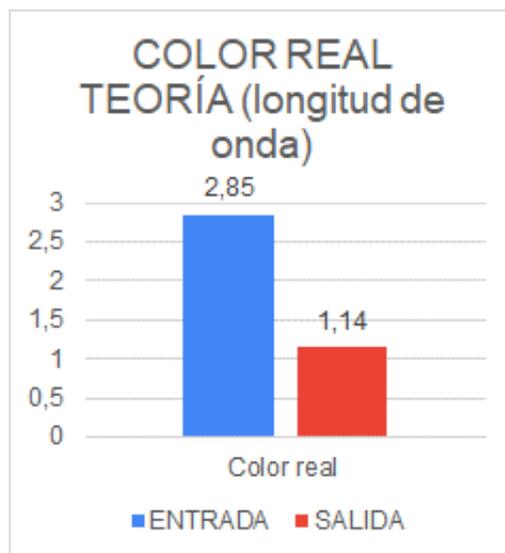
Gráfica 2. Concentración de componentes - Teoría vs GPS-X 7.0.1.



Fuente: Los autores.

➤ Filtro de Arena

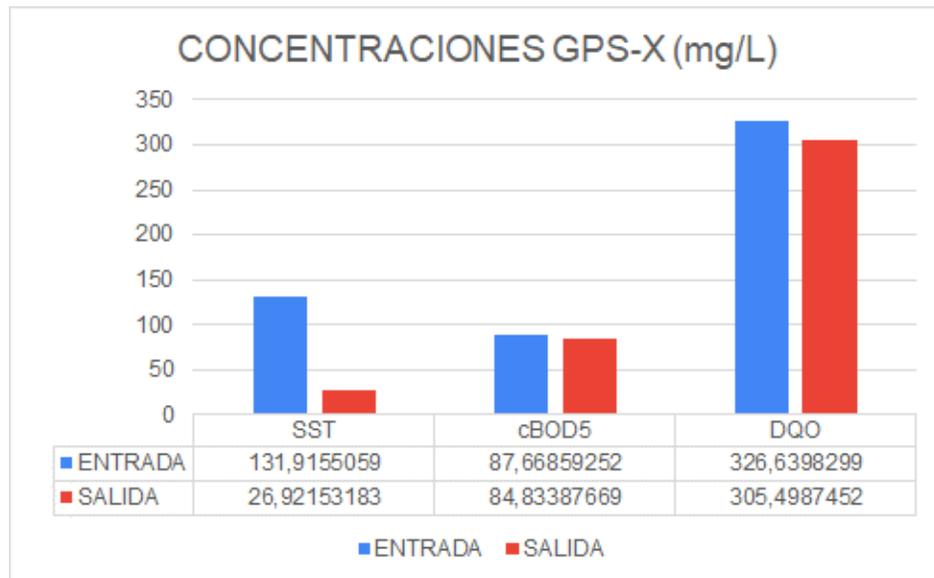
Gráfica 3. Entrada y salida de color real en la teoría



Fuente: Los autores

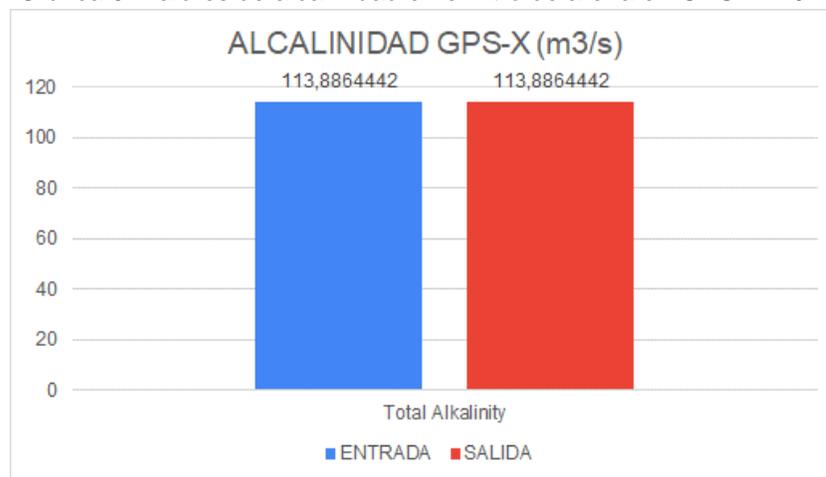
En el filtro de arena, se identificó esta variación entre entrada y salida con los porcentajes de remoción. Siendo un dato evidente el color para este tipo de residuos de la industria.

Gráfica 4. Entrada y salida de concentraciones [mg/L] de los componentes en el filtro de arena en GPS-X 7.0.1.



Fuente: Los autores

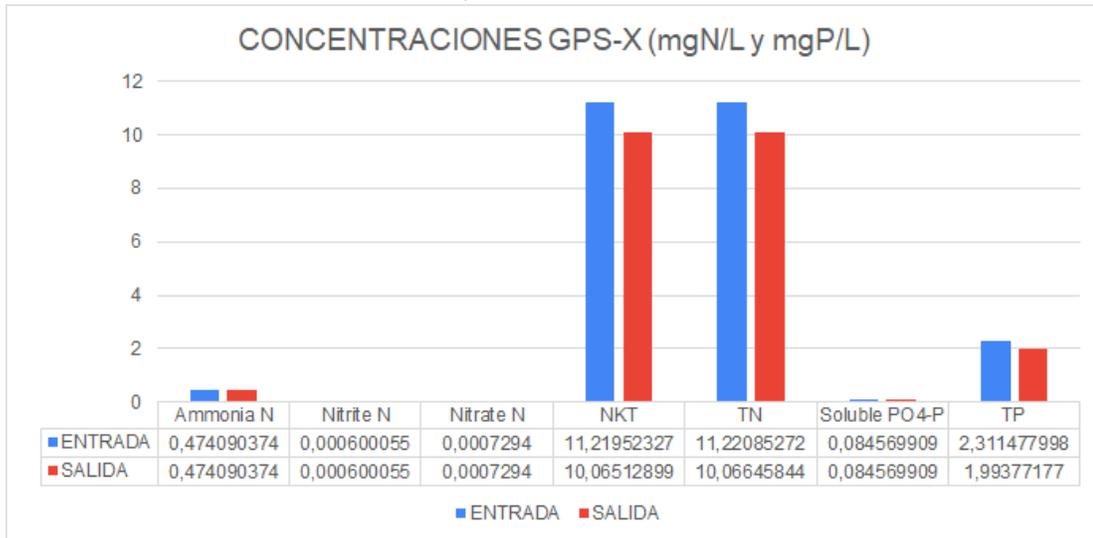
Gráfica 5. Valores de alcalinidad en el filtro de arena en GPS-X 7.0.1.



Fuente: Los autores

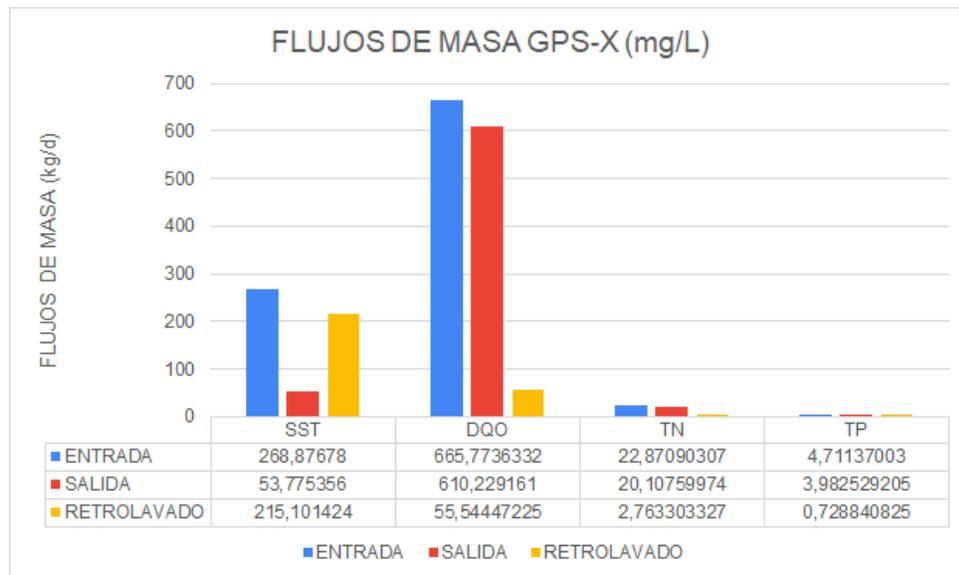
En el Filtro de arena, se evidencia que en el programa GPS-X 7.0.1 no arrojó variación en la alcalinidad.

Gráfica 6. Entrada y salida de concentraciones [mgN/L] y [mgP/L] en el filtro de arena, de los componentes en GPS-X 7.0.1.



Fuente: Los autores.

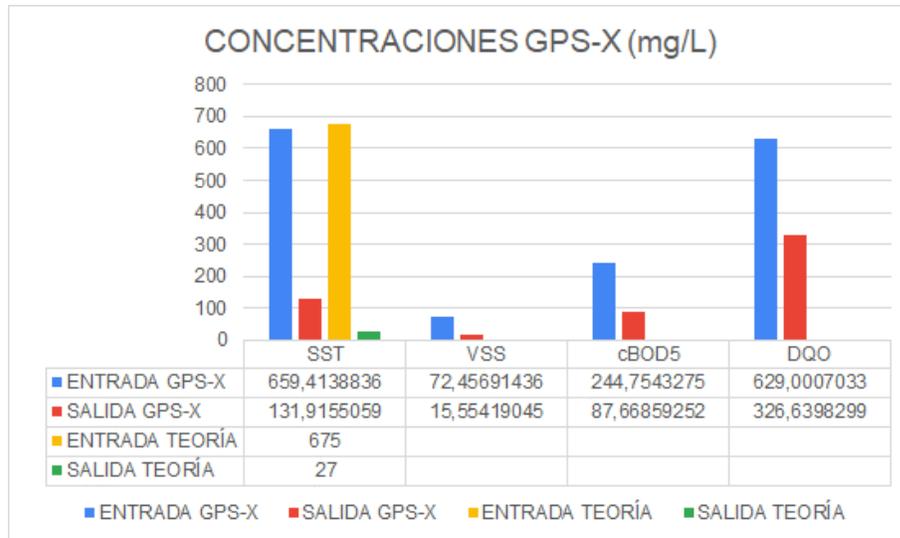
Gráfica 7. Entrada, salida y retro lavado de los flujos de masa de los componentes en el filtro de arena en GPS-X 7.0.1.



Fuente: Los autores.

➤ Filtro de carbón

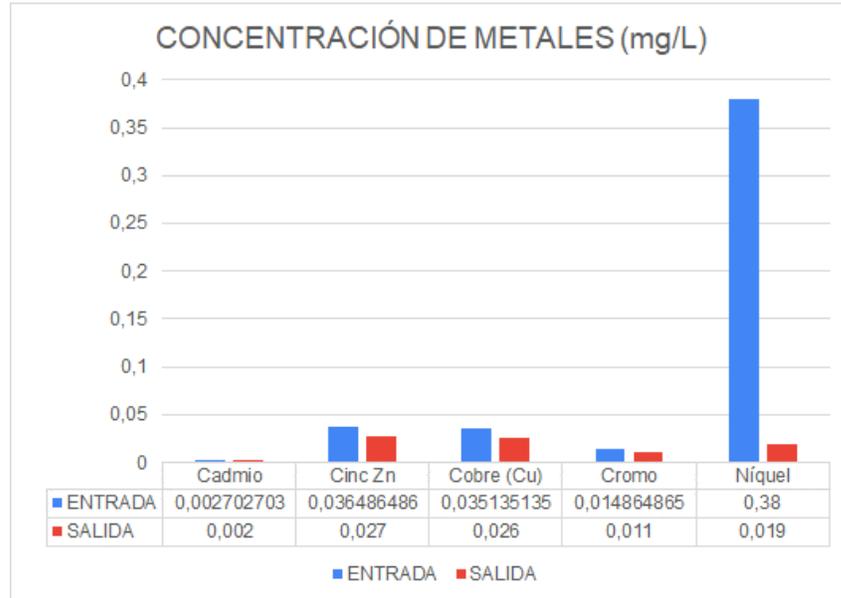
Gráfica 8. Entrada y salida de concentraciones de los componentes en el filtro de carbón en GPS-X 7.0.1 vs Teoría.



Fuente: Los autores.

Se hace comparativa de las concentraciones de entrada y salida del filtro de carbón, teniendo como evidencia la similitud de valores (altura entre barras), en específico en la concentración de los sólidos suspendidos tanto en la teoría como en el programa GPS-X 7.0.1. No se hizo el resto de las comparaciones con la teoría ya que no había valores para comparar.

Gráfica 9. Concentración de metales en el filtro de carbón en el cálculo teórico.



Fuente: Los autores.

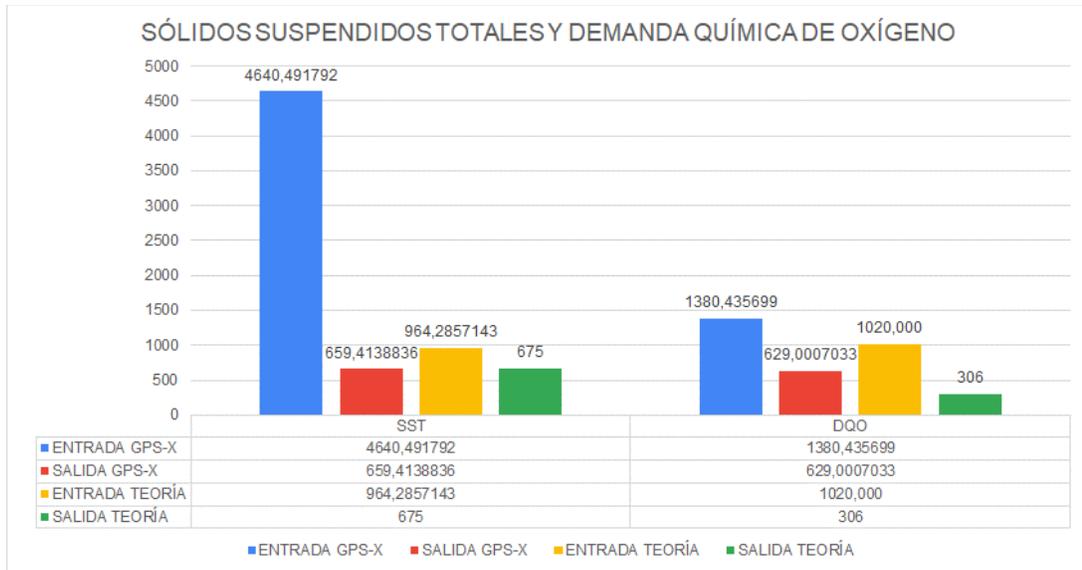
Para la concentración de los metales, la eficiencia del Níquel, mostró una mayor remoción.

➤ Deshidratador

Los resultados del deshidratador no cuentan con alguna relación entre datos calculados teóricamente y en el GPS-X, ya que con los datos proporcionados por la empresa sólo se pudo calcular el porcentaje de evaporación del agua, más no los componentes encontrados para esta estructura.

➤ Soliquator

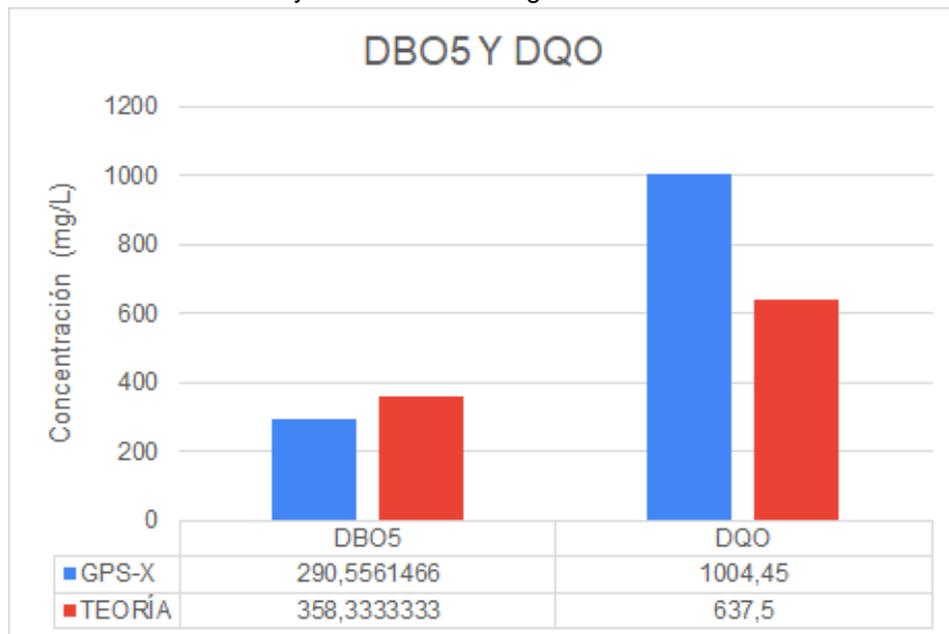
Gráfica 10. Entrada y salida de concentraciones de los componentes en el Soliquator en GPS-X 7.0.1 vs Teoría.



Fuente: Los autores.

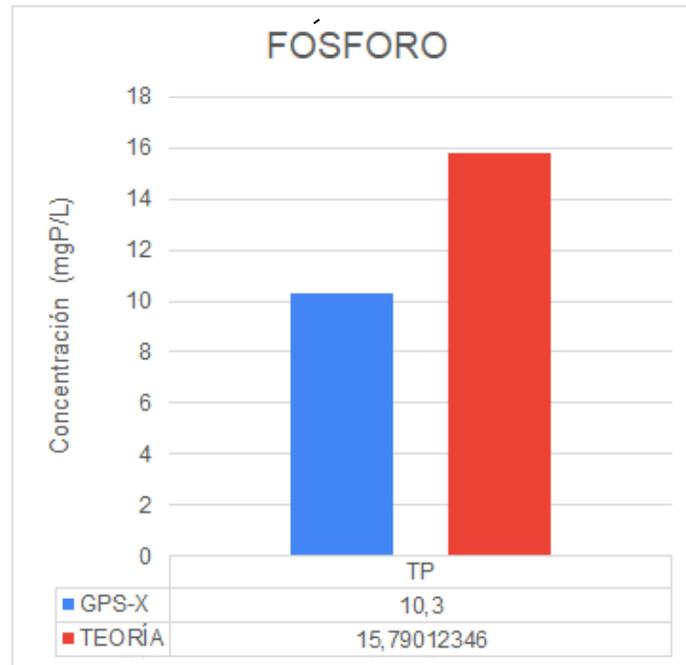
➤ Tanque de homogenización

Gráfica 11. Valores DBO₅ y DQO en la descarga del sistema - teoría vs GPS-X 7.0.1.



Fuente: Los autores.

Gráfica 12. Valores de fosforo en la descarga del sistema - teoría vs GPS-X 7.0.1.



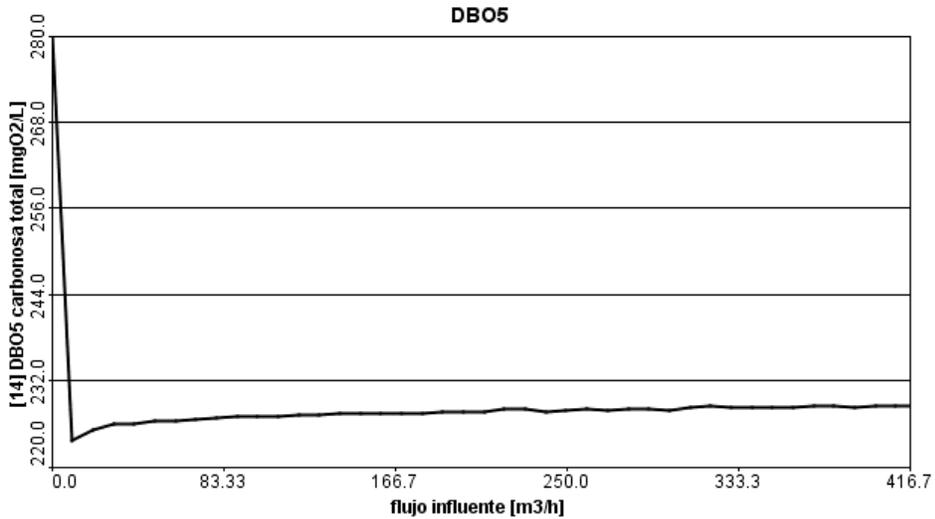
Fuente: Los autores.

9.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se entiende por análisis de sensibilidad a una técnica utilizada para determinar el comportamiento de diferentes valores de una variable independiente, impactando en una variable dependiente particular bajo un conjunto dado de suposiciones, y así mismo predecir el resultado de una decisión dado en un cierto rango de variables (efxto 2018). El análisis de sensibilidad se realizó por condición de operación en los principales procesos que influían en la calidad de los parámetros del agua, en especial con tres parámetros principales: DBO₅, DQO y SST.

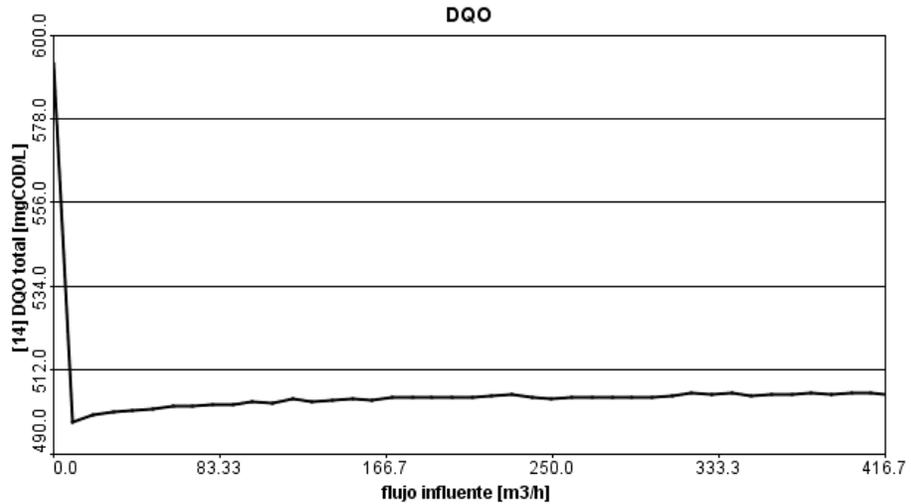
9.3.1. Flujo influente (m³/h)

Gráfica 13. Parámetro DBO₅ en flujo influente.



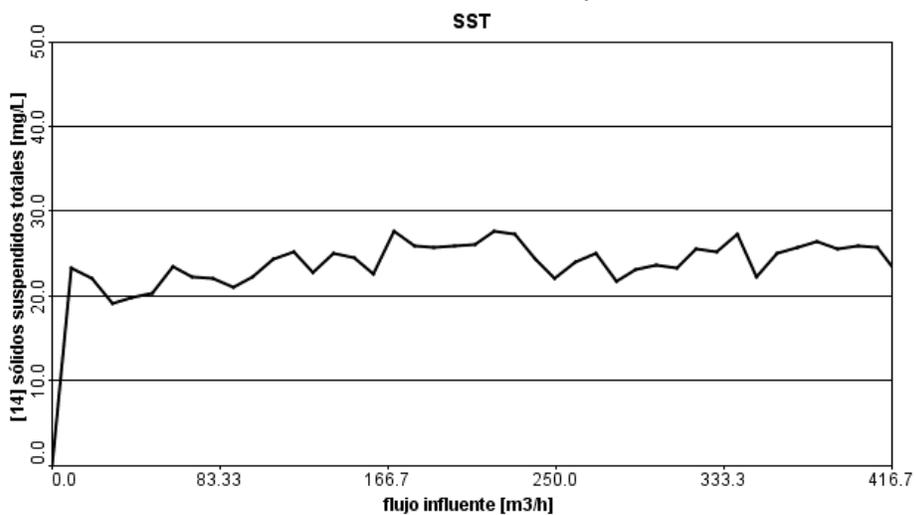
Fuente: Análisis sensibilidad programa GPS-X 7.0.1.

Gráfica 14. Parámetro DQO en flujo influente.



Fuente: Análisis sensibilidad programa GPS-X 7.0.1.

Gráfica 15. Parámetro SST en flujo influente.

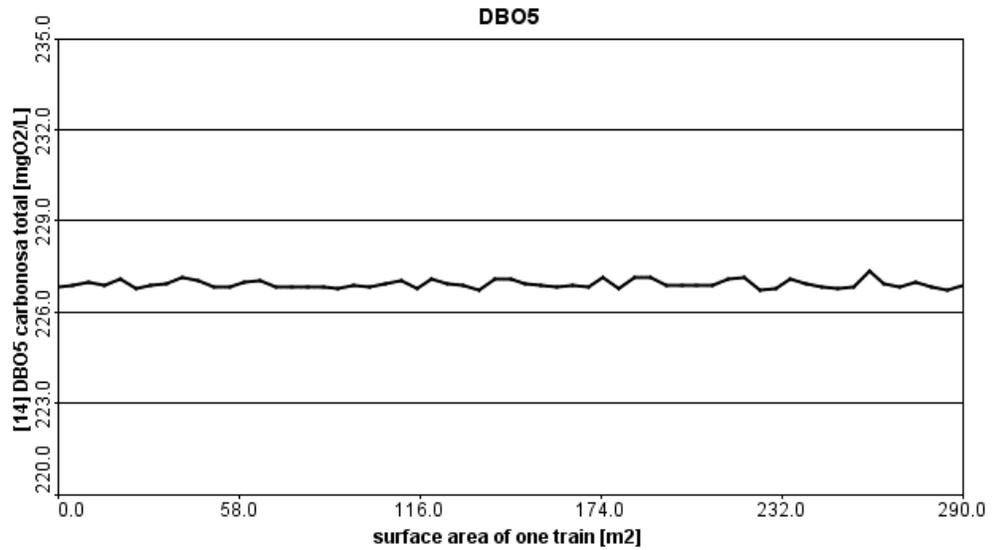


Fuente: Análisis sensibilidad programa GPS-X 7.0.1.

Como se evidencia, el flujo influente no disminuye su trayectoria de manera notoria en los parámetros de DQO y DBO₅ llegando a un pico mínimo y aumentando de manera gradual la concentración, a diferencia con los SST, que empieza su tendencia de forma ascendente y se aprecia que los límites de concentraciones varían constantemente entre 18mg/L y 27mg/L aproximadamente.

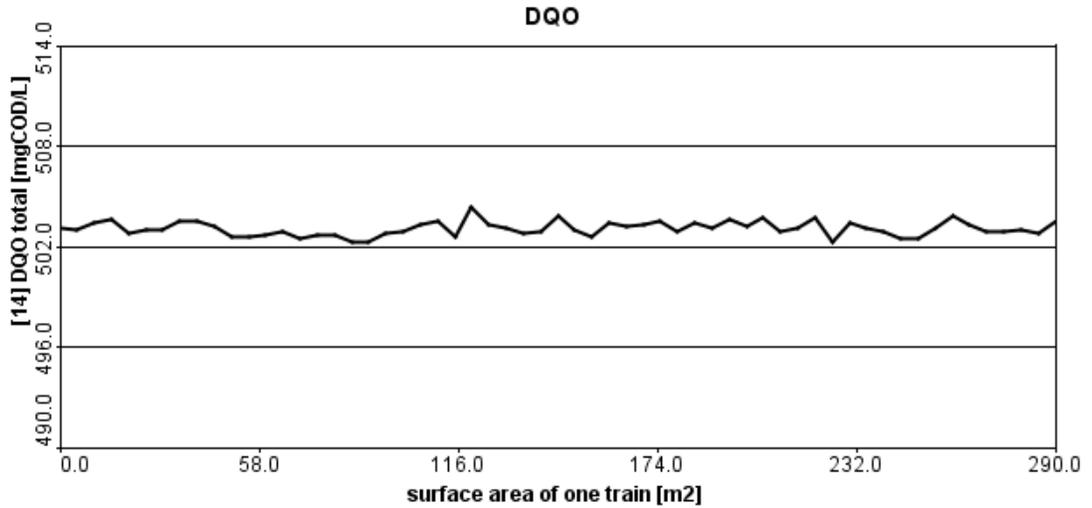
9.3.2. Superficie de un tren (m²)

Gráfica 16. Parámetro DBO₅ en flujo influente.



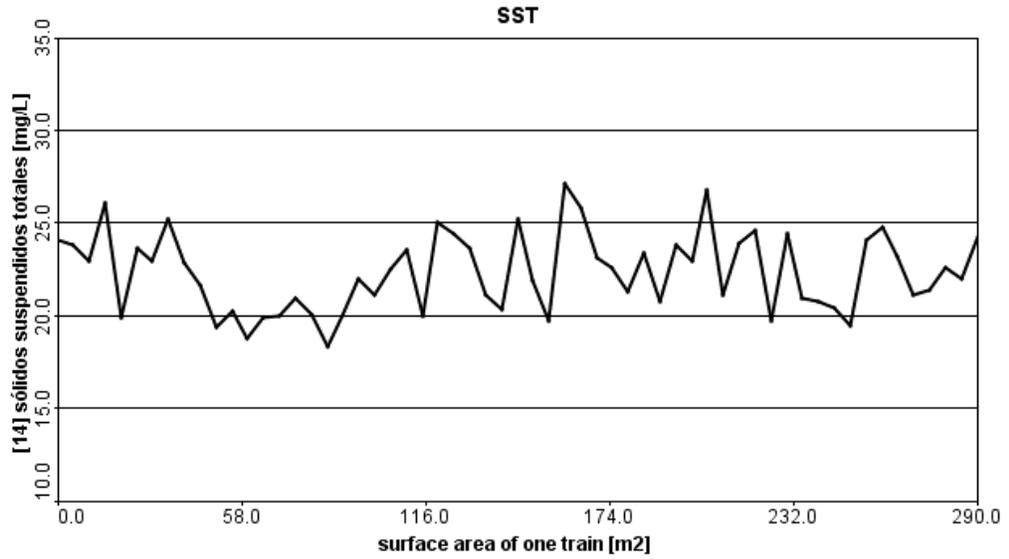
Fuente: Análisis sensibilidad programa GPS-X 7.0.1.

Gráfica 17. Parámetro DQO en flujo influente.



Fuente: Análisis sensibilidad programa GPS-X 7.0.1.

Gráfica 18. Parámetro SST en flujo influente.

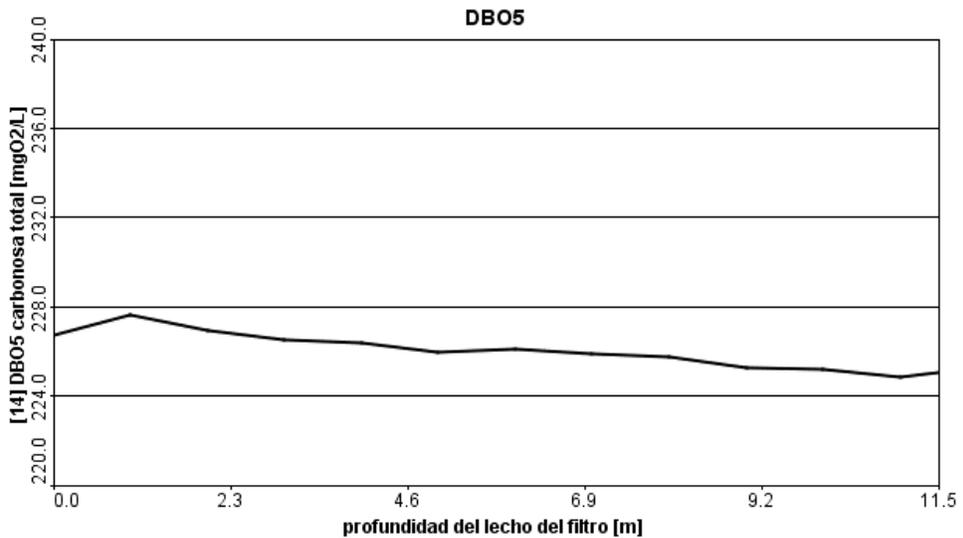


Fuente: Análisis sensibilidad programa GPS-X 7.0.1.

Para el caso de superficie de un tren la variación es evidente en los sólidos suspendidos totales donde sus picos máximos y mínimos se encuentran en valores de 27mg/L y 18mg/L respectivamente, por lo que se puede deducir que guarda una relación directa los sólidos suspendidos totales con la superficie de un tren.

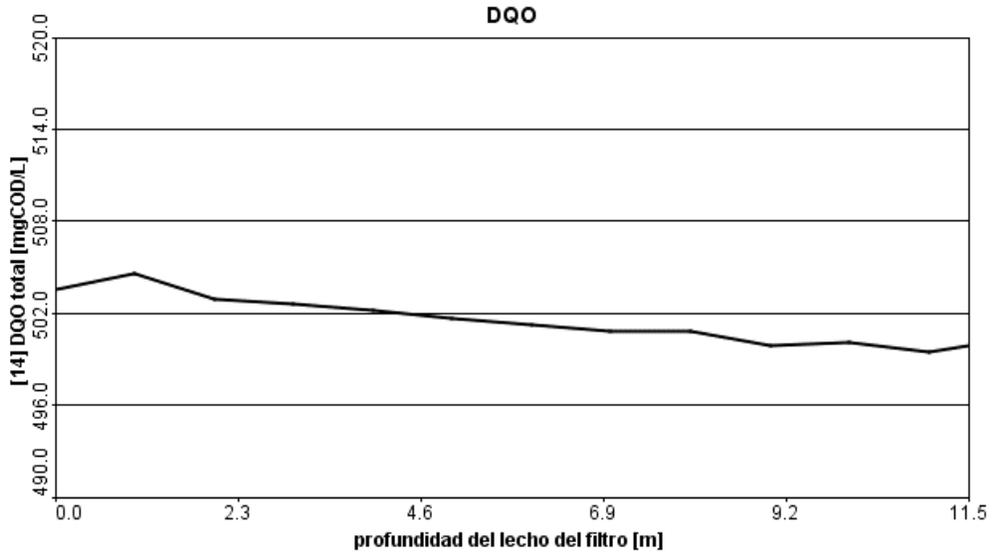
9.3.3. Profundidad del lecho del filtro (m)

Gráfica 19. Parámetro DBO₅ en la profundidad de lecho de filtro.



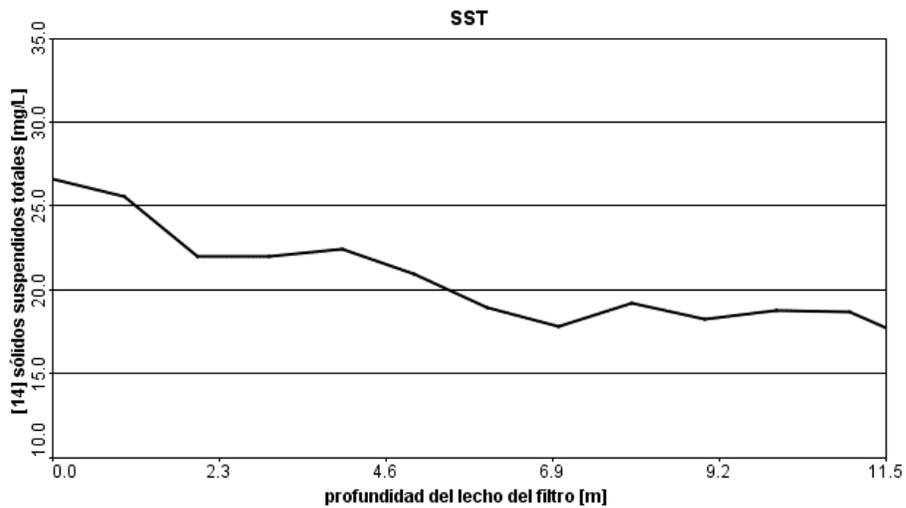
Fuente: Análisis sensibilidad programa GPS-X 7.0.1.

Gráfica 20. Parámetro DQO en la profundidad de lecho de filtro.



Fuente: Análisis sensibilidad programa GPS-X 7.0.1.

Gráfica 21. Parámetro SST en la profundidad de lecho de filtro.



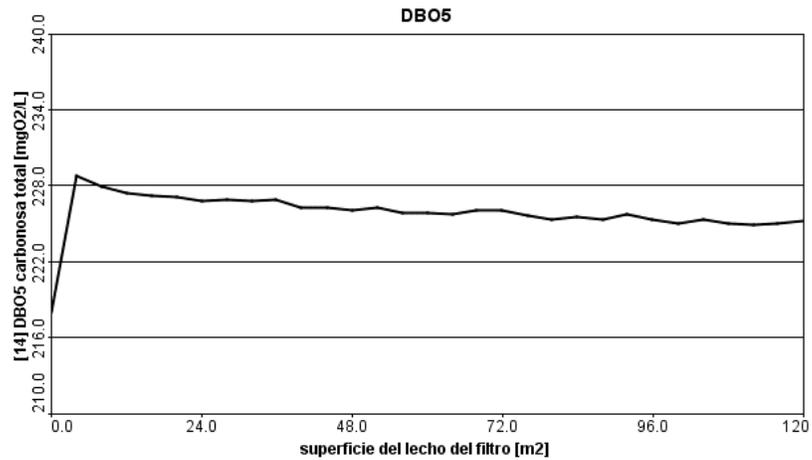
Fuente: Análisis sensibilidad programa GPS-X 7.0.1.

Ya para la profundidad del lecho del filtro, todos los componentes tienen variación notoria, pero el parámetro de los SST se pronuncia entre 17,5 mg/L y 27 mg/L. En todos los parámetros, la tendencia de las gráficas es descendente a medida que la profundidad aumenta: teniendo así una relación inversamente proporcional entre las concentraciones y la profundidad de lecho (la escala de las gráficas en el eje de

concentraciones varía para lograr tener una mejor apreciación de las variaciones con esta condición de operación).

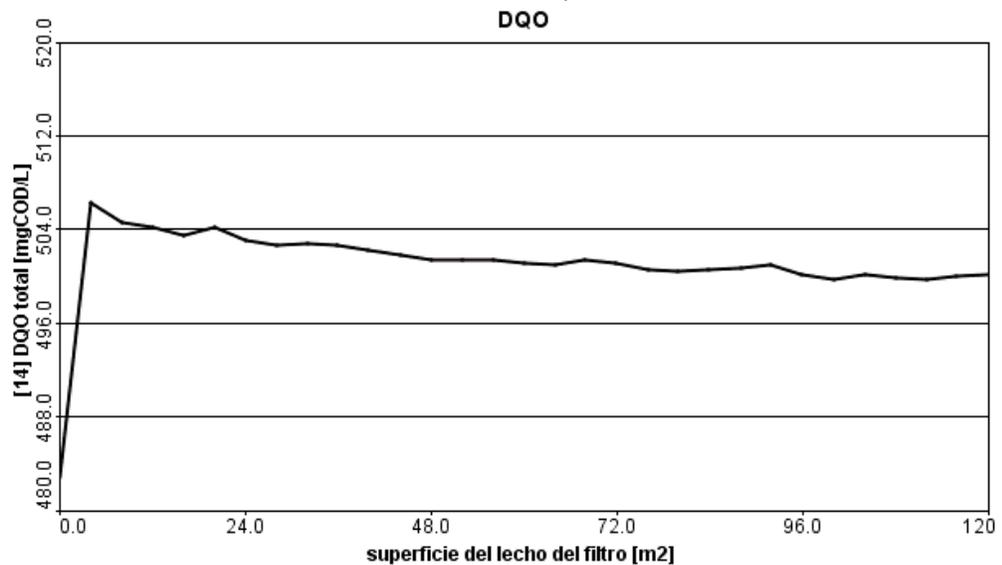
9.3.4. Superficie del lecho del filtro (m²)

Gráfica 22. Parámetro DBO₅ en la superficie del lecho de filtro.



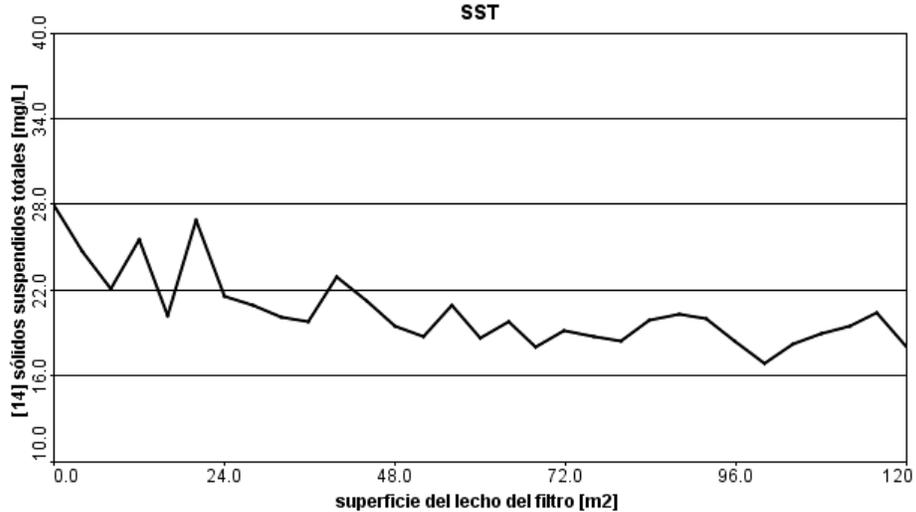
Fuente: Análisis sensibilidad programa GPS-X 7.0.1.

Gráfica 23. Parámetro DQO en la superficie del lecho de filtro.



Fuente: Análisis sensibilidad programa GPS-X 7.0.1.

Gráfica 24. Parámetro SST en la superficie del lecho de filtro.

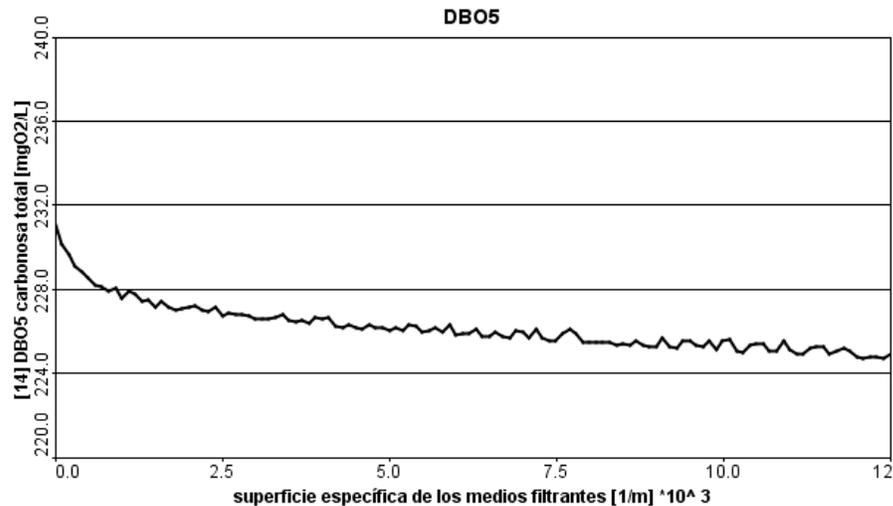


Fuente: Análisis sensibilidad programa GPS-X 7.0.1.

En la superficie de lecho del filtro se ve la diferencia entre los parámetros DQO y DBO₅ con los SST. Los primeros parámetros, la secuencia de datos llegan a un pico máximo de concentración y sigue su descenso a medida que aumenta la superficie de lecho de filtro en m². Se muestra también en los SST la variación notoria con tendencia descendente, igualmente se juega un poco con las escalas para lograr tener una mejor apreciación de la variación de las concentraciones con la superficie del lecho del filtro.

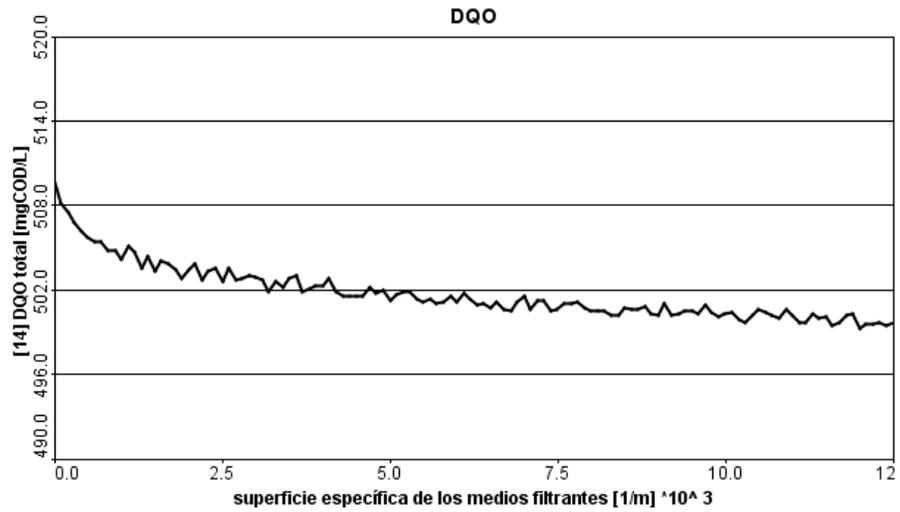
9.3.5. Superficie específica de los lechos filtrantes ((1/m) x10³)

Gráfica 25. Parámetro DBO₅ en la superficie específica de los lechos filtrantes.



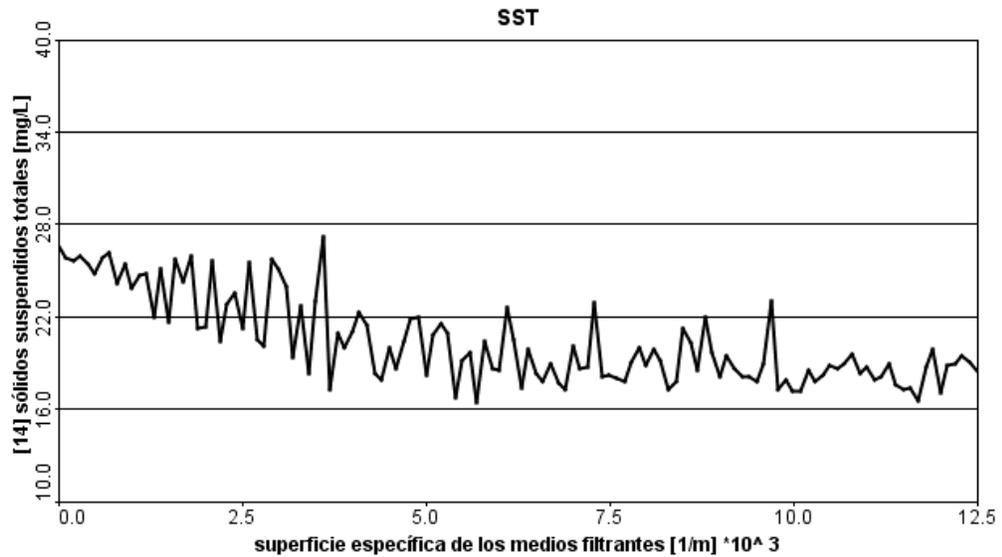
Fuente: Análisis sensibilidad programa GPS-X 7.0.1.

Gráfica 26. Parámetro DQO en la superficie específica de los lechos filtrantes.



Fuente: Análisis sensibilidad programa GPS-X 7.0.1.

Gráfica 27. Parámetro SST en la superficie específica de los lechos filtrantes.

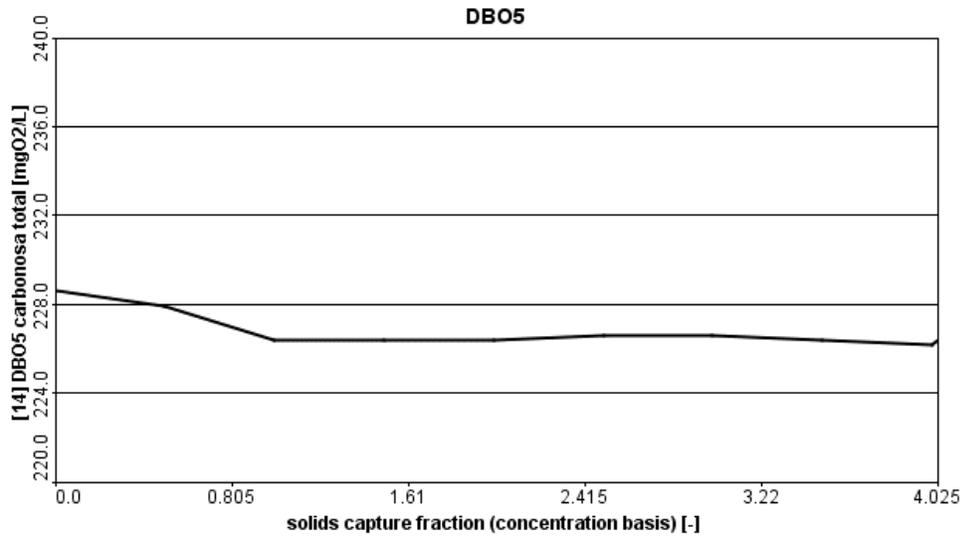


Fuente: Análisis sensibilidad programa GPS-X 7.0.1.

En el caso de las superficies específicas de lechos filtrantes, las gráficas corresponden a una lectura exponencial descendente, donde se evidencia mayor variación en los SST, con picos notorios de superficies específicas en $2,7 m^{-1} \cdot 10^3$ y $7,9 m^{-1} \cdot 10^3$.

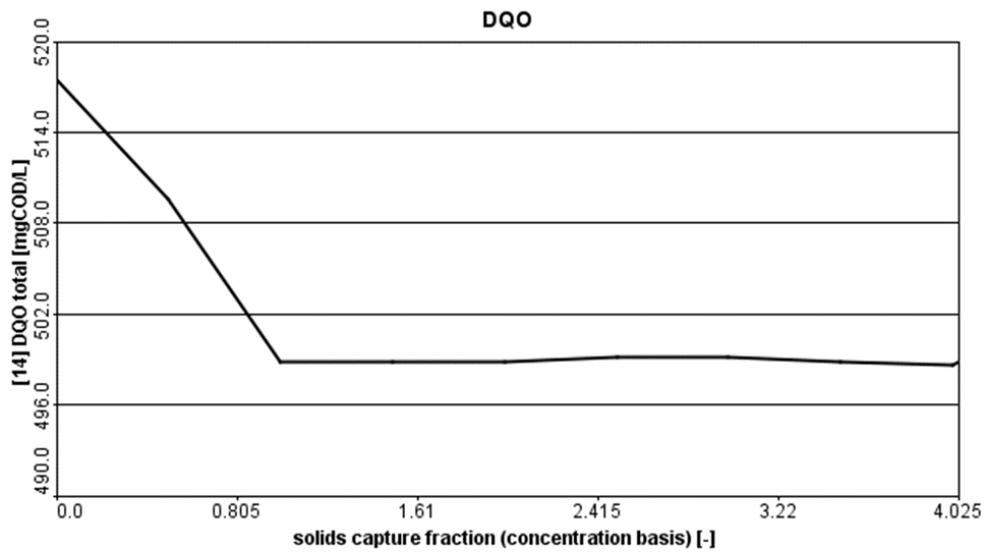
9.3.6. Fracción de captura de sólidos ((concentración base) (-))

Gráfica 28. Parámetro DBO₅ en la fracción de captura de sólidos.



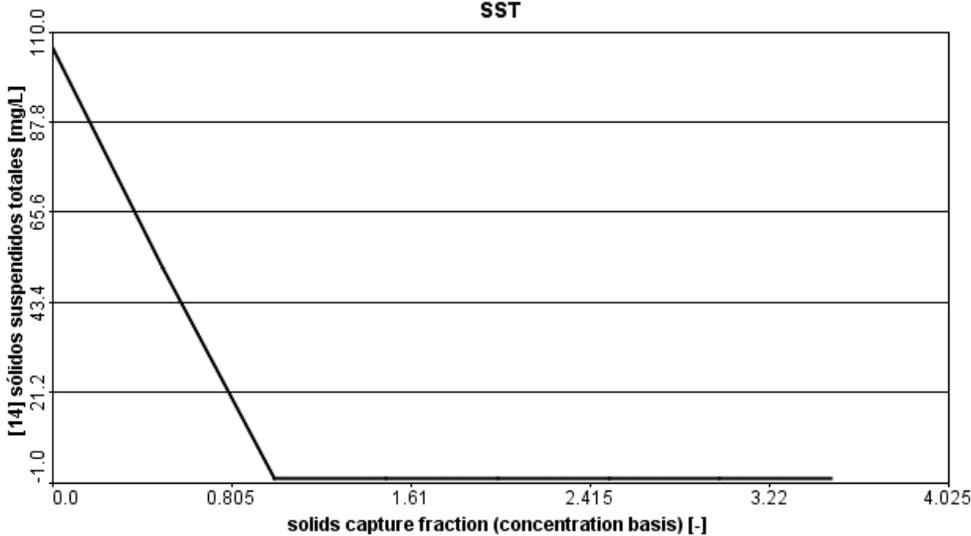
Fuente: Análisis sensibilidad programa GPS-X 7.0.1.

Gráfica 29. Parámetro DQO en la fracción de captura de sólidos.



Fuente: Análisis sensibilidad programa GPS-X 7.0.1.

Gráfica 30. Parámetro SST en la fracción de captura de sólidos.



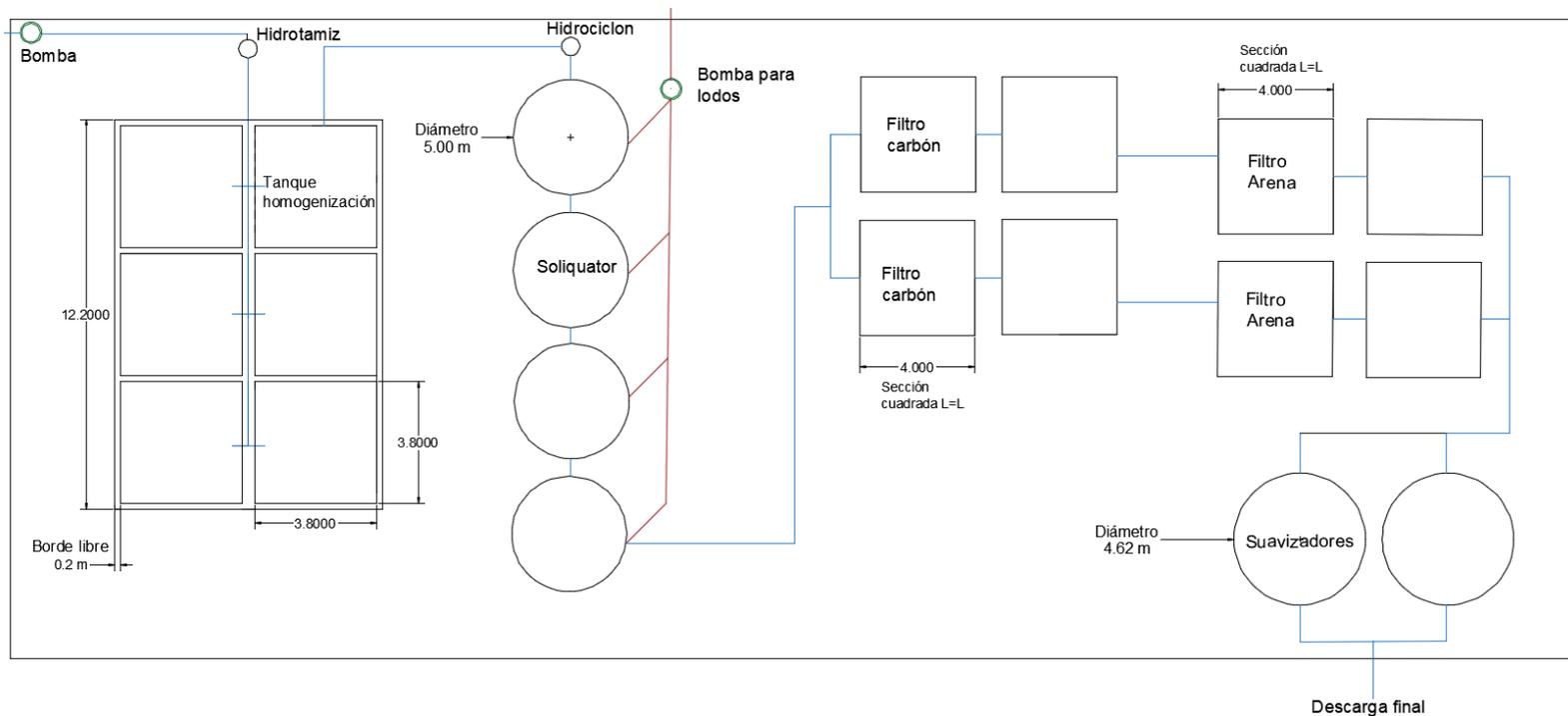
Fuente: Análisis sensibilidad programa GPS-X 7.0.1.

Para la condición de operación, la fracción de captura de sólidos, generan un pico mínimo, donde la concentración de los SST llega a un punto negativo a diferencia del DBO₅ y DQO.

9.4. CÁLCULO DE BALANCE DE ENERGÍA

Inicialmente para tener una guía de la cantidad de reactores necesarios en la PTAR textil, con la información del área total de 780 m², se procedió a realizar un esquema en planta en AutoCAD (*Figura 30. Esquema en planta - Planta de tratamiento residual industria textil.*), para los respectivos cálculos de cada proceso implementado.

Figura 30. Esquema en planta - Planta de tratamiento residual industria textil.



Fuente: Los autores.

La planta se compone inicialmente de un hidrotamiz su principal función es retener fibras o pelusas. Siguiendo a éste encontramos el tanque de homogenización que permite, como su nombre lo dice, homogenizar el contenido del agua residual dispuesto después del tratamiento final en la fábrica. Para el cálculo del tanque de homogenización, se realizó el siguiente procedimiento y sus valores están registrados en la *Tabla 30. Cálculo volumen tanque homogenización.*, y la *Tabla 31. Dimensiones tanque homogenización:*

1. Asumir un valor de retención hidráulica de 50 min para proceder a calcular el volumen del tanque con la ecuación 9:

$$Volumen = Caudal * tiempo = 86 \frac{L}{s} * 3000s = 258000 L \quad (9)$$

$$Volumen = \frac{258000 L}{1000 L} = 258 m^3 \quad (10)$$

Tabla 30. Cálculo volumen tanque homogenización.

Volumen tanque		
Variable	Valor	Unidad
Tiempo	50	min
	3000	s
Caudal	86	L/s
Volumen	258000	L
	258	m ³

Fuente: Los autores

2. Para las dimensiones del tanque, como ya se conoce el volumen total, este se divide en 6 compartimientos:

$$Volumen \text{ por compartimiento} = \frac{258 m^3}{6} = 43 m^3 \quad (11)$$

3. Luego se asumió una altura útil del tanque de 3 m para calcular el área superficial de tanque:

$$\text{Área superficial} = \frac{Volumen}{\text{Altura útil}} = \frac{43 m^3}{3 m} = 14,33 m^2 \quad (12)$$

4. Para hallar cada lado del tanque, se consideró que cada compartimento fuera cuadrado es decir que sus lados sean iguales, por lo tanto, cada lado es igual:

$$Lado = \sqrt{\text{Área superficial}} = \sqrt{14,33 \text{ m}^2} = 3,8 \text{ m.} \quad (13)$$

Tabla 31. Dimensiones tanque homogenización

Dimensiones tanque		
Variable	Valor	Unidad
Volumen	43	m ³
H util	3,00	m
Área superficial	14,3333	m ²
Lado	3,8	m

Fuente: Los autores

Por otro lado, la planta se compone de un reactor, denominado Soliquator el cual se compone de una mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentación para este sistema se hizo énfasis en la mezcla rápida y lenta asumiendo que este haya sido empleado por agitación, con la finalidad de obtener la potencia y dimensiones requeridas por este reactor, para el cual se realizaron los siguientes cálculos:

1. Para el cálculo de la mezcla rápida (coagulación) se determina el tipo de agitación que va tener este proceso, el cual se determinó que fuera hidráulica, esta información se toma del RAS 0330 de 2017 (Ministerio de Vivienda 2017) registrado en la *Tabla 32. Valores de gradiente hidráulico y tiempo de mezcla de acuerdo a tipo de agitación.*

Tabla 32. Valores de gradiente hidráulico y tiempo de mezcla de acuerdo a tipo de agitación.

COAGULACIÓN			
Tipo agitación	Rango gradiente hidráulico	Unidades	Tiempo de mezcla
Mecánica	1000-2000	s-1	< 1 s
Hidráulica	500- 2000	s-1	<60 s

Fuente: MINISTERIO DE VIVIENDA, C. y T.C., 2017. RAS 0330 - 2017 [en línea]. 2017. S.l.: s.n. Disponible en: <http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/0330 - 2017.pdf>.

2. Igualmente se tomaron valores de entrada y variables asumidas de acuerdo al tipo de mezcla escogido y a referencias de diseño del libro Purificación de agua (Romero Rojas 2002), con los que se establecieron diferentes rangos en los que se debe encontrar cada variable y realizar los respectivos cálculos necesarios, registrados en la *Tabla 33. Datos de entrada tomados para el diseño de coagulación.*

Tabla 33. Datos de entrada tomados para el diseño de coagulación.

Datos de entrada		
Variable	Valor	Unidad
Reynolds	500000	Regimen turbulento
Gradiente hidráulico	700	s ⁻¹
Tiempo	40	s
Diámetro paletas	0,5	m
Cantidad paletas planas	6	UND
Coefficiente tañamo-forma	6,3	-
Medellin	25	°C
Viscosidad dinámica	9,11E-04	kg/m*s
Densidad	997,1	kg/m ³

Fuente: ROMERO ROJAS, J.A., 2002. Potabilización del Agua. 3a Edición. S.l.: s.n.

3. Por otro lado, para el cálculo del volumen se tomó el valor del caudal y valor del tiempo de mezcla menor al valor resaltado en la *Tabla 32. Valores de gradiente hidráulico y tiempo de mezcla de acuerdo a tipo de agitación.*, en donde los valores calculados se registraron en la *Tabla 34. Volumen reactor-mezcla rápida.*

$$\text{Volumen} = \text{Caudal} * \text{tiempo de mezcla} \quad (14)$$

$$\text{Volumen} = 86 \frac{L}{s} * 40 s = 3440 L \quad (15)$$

Tabla 34. Volumen reactor-mezcla rápida.

Volumen reactor		
Variable	Valor	Unidad
Tiempo	40	s
Caudal	86	L/s
Volumen	3440	L
	3,44	m ³

Fuente: Los autores.

4. A partir del número de Reynolds establecido en un principio en los datos de entrada se halla N (movimiento angular de las paletas) con sus respectivas unidades para poder calcular la potencia requerida por este proceso, los resultados están registrados en la *Tabla 35. Valor de la potencia requerida para la mezcla rápida.*

$$N = \frac{NR * v}{densidad * \emptyset paletas^2} \quad (16)$$

$$N = \frac{500000 * 0,000911 \frac{kg}{m * s}}{997,1 \frac{kg}{m^3} * 0,5m^2} = 1,827 RPS \quad (17)$$

$$Potencia = \beta * densidad * N^3 * \emptyset paletas^5 \quad (18)$$

$$Potencia = 6,3 * 997,1 \frac{kg}{m^3} * N1,827RPS^3 * 0,5m^5 = 1197,7 Watts \quad (19)$$

Donde; *NR: Número de Reynolds*
v: Viscosidad dinámica
β: Coeficiente tamaño – forma
N: Movimiento angular de las paletas

Tabla 35. Valor de la potencia requerida para la mezcla rápida.

Cálculo potencia		
Variable	Valor	Unidad
N	1,827	RPS
	109,638	RPM
Potencia	1197,728149	Watts
Con eficiencia motor 70%	1330,809055	Watts

Fuente: Los autores.

5. Finalmente se halla las dimensiones de cada reactor, es decir que la PTAR de la industria textil dispone 4 reactores para este proceso, para esta parte se divide el volumen total que está en m³ sobre los 4 reactores. Ya para el cálculo de las dimensiones del reactor se tienen varias consideraciones; primero el reactor es circular y segundo que la altura es igual al diámetro y a la longitud.

$$Volumen de cada reactor = \frac{Volumen}{4} = \frac{5,16 m^3}{4} = 1,29 m^3 \quad (20)$$

$$\text{Diámetro cada reactor} = \sqrt[3]{\frac{4 * \text{volumen}}{\pi}} = 1,03 \text{ m} \quad (21)$$

Tabla 36. Dimensión reactor - mezcla rápida.

Dimensiones reactor		
Variable	Valor	Unidad
Volumen	0,86	m ³
Diámetro reactor	1,03	m

Fuente: Los autores.

6. Para el cálculo del floculador, se eligió un floculador de eje vertical y tomaron diferentes valores de entrada sacados del libro Purificación de agua (Romero Rojas 2002) registrados en la *Tabla 37. Datos de entrada floculador - eje vertical.*

Tabla 37. Datos de entrada floculador - eje vertical.

Datos de entrada		
Variable	Valor	Unidad
Caudal	86	L/s
Gradiente hidráulico	50	s ⁻¹
Tiempo mezcla	7	min
Viscosidad	9,11E-04	kg/m*s
Densidad	997,1	kg/m ³
H útil	4	m
Diseño estimado	1 eje; 1 rueda; 2 paletas	

Fuente: Los autores.

7. En el cálculo del volumen con el que trabaja el reactor de mezcla lenta, se tiene en cuenta el tiempo de mezcla que se tuvo en cuenta en la *Tabla 37. Datos de entrada floculador - eje vertical.*, con su respectiva conversión de minutos a segundos y obtener el volumen total.

$$\text{Volumen} = \text{Caudal} * \text{tiempo de mezcla} \quad (22)$$

$$\text{Volumen} = 86 \frac{L}{s} * 420 \text{ s} = 36120 \text{ L} \quad (23)$$

Tabla 38. Volumen reactor - mezcla lenta.

Volumen reactor		
Variable	Valor	Unidad
Tiempo	420	s
Caudal	86	L/s
Volumen	36120	L
	36,12	m ³

Fuente: Los autores.

8. Para las dimensiones del reactor inicialmente se tomó el volumen total y se dividió por el número de reactores destinados para el proceso integrado de la mezcla lenta, que en este caso son cuatro reactores, además se realizan los datos de área del reactor considerando una altura útil de 4 m registrados en la *Tabla 37. Datos de entrada floculador - eje vertical.*, igualmente las dimensiones necesarias para la mezcla lenta se registran en la *Tabla 39. Dimensiones reactor -mezcla lenta.*

$$\text{Volumen de cada reactor} = \frac{\text{Volumen}}{4} = \frac{36,12 \text{ m}^3}{4} = 9,03 \text{ m}^3 \quad (24)$$

$$\text{Área sección} = \frac{\text{Volumen}}{H \text{ útil}} = \frac{9,03 \text{ m}^3}{4} = 2,26 \text{ m}^2 \quad (25)$$

$$\text{Radio} = \sqrt{\frac{\text{Área sección}}{\pi}} = 0,85 \text{ m} \quad (26)$$

$$\text{Diámetro reactor (dr)} = 2 * \text{radio} = 2 * 0,85 \text{ m} = 1,7 \text{ m} \quad (27)$$

$$\text{Diámetro rueda} = dr - 2 * \text{borde libre} = 1,7 \text{ m} - 2 * 0,4 \text{ m} = 0,9 \text{ m} \quad (28)$$

$$\text{Largo paleta} = H \text{ útil} - 2 * \text{borde libre} = 4 \text{ m} - 2 * 0,4 \text{ m} = 3,2 \text{ m} \quad (29)$$

Tabla 39. Dimensiones reactor -mezcla lenta.

Dimensiones reactor		
Volumen	9,03	m ³
Área sección	2,26	m ²
Radio	0,85	m
Diámetro reactor	1,70	m
Diámetro rueda	0,90	m
Borde libre	0,4	m
Largo paleta	3,2	m
Área total reactor	2,26	m

Fuente: Los autores.

9. Por último, para la mezcla lenta se determina la potencia necesaria para el debido funcionamiento de los 4 reactores para este proceso, el cual se hace con la ecuación 30:

$$Potencia = Gradiente\ hidráulico^2 * viscosidad * volumen \quad (30)$$

$$Potencia = (50s^{-1})^2 * 0,000911 \frac{kg}{m * s} * 36,12 m^3 = 82,26 Watts \quad (31)$$

Tabla 40. Potencia requerida - mezcla lenta.

Potencia	82,2633	watts
	0,11	hP

Fuente: Los autores.

10. Para el diseño del proceso de sedimentación, se realizó el diseño de un sedimentador de alta tasa y los diferentes cálculos realizados se registraron en la *Tabla 41. Diseño sedimentador de alta tasa.*

$$A = Ls * As = 5m * 5m = 25m^2 \quad (32)$$

$$Ancho\ sedimentador\ 4\ reactores = \frac{5\ m}{4} = 1,25\ m \quad (33)$$

$$A\ útil = Ls - \sqrt{Alp^2} - (\sin \theta * Alp)^2 * As \quad (34)$$

$$A\ útil = 5\ m - \sqrt{(1,5m)^2} - (\sin 60^\circ * 1,5\ m)^2 * 5m = 21,25\ m^2 \quad (35)$$

$$CS = \frac{Qd}{A} = \frac{0,086 \frac{m^2}{s}}{25\ m^2} * 86400s = 297,216\ m/día \quad (36)$$

$$Vo = \frac{Qd}{Ls * As * \sin \theta} = \frac{0,086 \frac{m^3}{s} * 86400s}{5m * 5m * \sin 60^\circ} = 343,195 \frac{m}{d} \quad \text{ó} \quad 0,238 \frac{m}{min} \quad (37)$$

$$Número\ Reynolds = \frac{Vo * d}{viscosidad} = \frac{343,195 \frac{m}{d} * 0,045m}{0,00000914 \frac{m^2}{s} * 86400s} = 196 \quad (38)$$

Donde; *A*: Área sedimentación acelerada
Ls: Longitud del sedimentador
As: Ancho del sedimentador
Alp: Alto placas
A útil: Área útil sedimentador

CS: Carga superficial
Qd: Caudal de diseño
Vo: Velocidad de sedimentación
d: Separación entre placas

Igualmente se hacen unos chequeos con los valores calculados como el valor de carga superficial que debe estar entre 200-300 m/día, por lo cual cumple ya que el valor calculado dio de 297,216 m/día según la ecuación 36, lo mismo se hace con el número de Reynolds calculado que debe ser menor a 250 y según la ecuación 38 el número de Reynolds da 196 por lo cual también cumple.

Tabla 41. Diseño sedimentador de alta tasa.

SEDIMENTADOR DE ALTA TASA				
PARAMETRO	SIMBOLO	RESULTADO	UNIDADES	NOTA
Caudal de diseño	Qd	86	L/s	Asumido
		0,086	m ³ /s	Calculado
Viscosidad cinemática	μ	9,14E-07	m ² /s	Asumido
Temperatura	T	25	°C	Asumido
Ancho de Placas	Ap	2	m	Asumido
Alto de placas	Alp	1,5	m	Asumido
Área de sedimentación acelerada	A	25	m ²	Calculado
Inclinacion de las placas	θ	60	°	Asumido
Longitud del sedimentador	Ls	5	m	Asumido
Ancho del sedimentador	As	5	m	Asumido
Ancho del sedimentador, considerando 4 reactores	As	1,25	m	Calculado
Radio	r	0,630783131	m	Calculado
diámetro	d	1,261566261	m	Calculado
Área útil del Sedimentador	A útil	21,25	m ²	Calculado
Altura del Sedimentador	Ase	4	m	Asumido
Carga Superficial	CS	297,216	m/d	Calculado
Coefficiente de rugosidad	n	0,01	-	
Cumple CS (200-300)				
Velocidad en el sedimentador	Vo	343,1954752	m/d	Calculado
		0,238330191	m/min	Calculado
Espesor de placas	e	0,015	m	Asumido
Separación entre placas	d	0,045	m	Asumido
Número de Reynolds	Re	196	-	Calculado
Cumple Número Reynolds <250				

Fuente: Los autores.

11. Igualmente se realizaron unos cálculos para verificar que el diseño y todas las variables que se tuvieron en cuenta, se hayan tomado de forma correcta con las siguientes ecuaciones, para este caso se deja una longitud del tanque de sedimentación libre como una buena práctica que permite las buenas condiciones de entrada del caudal, aunque en la entrada existe una región de transición que se considera como la longitud relativa entre tubos. (Romero Rojas 2002)

$$L = \frac{Qd}{d} = \frac{0,086 \frac{m^3}{s}}{0,045 m} = 33,33 m \quad (39)$$

$$L' = \frac{0,013 * V_o * d}{viscosidad} = \frac{0,013 * 0,238 \frac{m}{min} * 0,045m}{0,000000914 \frac{m^2}{s} * 60 s} = 2,55 m \quad (40)$$

$$L_c = 33,33 m - 2,55 m = 30,78 m \quad (41)$$

$$V_{sc} = \frac{V_o}{\sin \theta + L_c * \cos \theta} = \frac{343,195 \frac{m}{d}}{\sin 60^\circ + 2,55 m * \cos 60^\circ} = 21,2 \frac{m}{día} \quad (42)$$

$$t = \frac{Alp}{V_o} = \frac{1,5 m}{0,238 \frac{m}{min}} = 6,29 min \quad (43)$$

$$T = \frac{L_s * A_s * A_{se}}{Qd} = \frac{5m * 5m * 4m}{0,086 \frac{m^3}{s} * 60s} = 19,38 min \quad (44)$$

$$N = \frac{L_s * Alp * \cos \theta * \sin \theta + d}{d + e} \quad (45)$$

$$N = \frac{5m * 1,5m * \cos 60^\circ * \sin 60^\circ + 0,045m}{0,045m + 0,015m} = 62 UND$$

Tabla 42. Registro valores, comprobación diseño.

COMPROBACIÓN DISEÑO				
Longitud	L	33,33	m	Calculado
Longitud relativa de sedimentacion prima	L'	2,55	m	Calculado
Longitud relativa- logitud prima	Lc	30,78	m	Calculado
Velocidad Superficial de sedimentacion de alta Tasa	Vsc	21,2	m/d	Calculado
CUMPLE PARA FLOCULO DE SULFATO DE ALUMINIO $13 > V_{sc} < 60$				
Tiempo de retencion en las celdas	t	6,29	min	Calculado
Cumple Tiempo (6-10)				
Tiempo de retencion en el tanque de sedimentacion	T	19,38	min	Calculado
Número de Placas	N	62,09	UND	Calculado
Area de flujo de agua a través de las placas	AflujoPlacas	13,75	m	Calculado
Pérdidas a través de las placas	Pérdidas	0,000001995	m	Calculado
Ecuaciones tomadas del libro Purificacion del agua (Jairo Romero Rojas) 2da edición				

Fuente: Los autores

12. Por último, como el tanque soliquator es un 3 en 1; es decir, contiene el coagulador, floculador y sedimentador, lo que se hizo fue sumar las dimensiones de diámetro para 1 de los cuatro 4 reactores, ya que las dimensiones van a ser iguales para todos. También se sumó la energía requerida para este tanque que se calculó para la mezcla rápida y lenta considerando que la sedimentación funciona por gravedad, por otro lado, se pasó la medida de energía de Watts a kWh es decir se evaluó esa energía requerida por el reactor en un tiempo determinado en este caso por una hora, ya que así se necesitaba para el programa GaBi.

$$\text{Diámetro Soliquator} = D_c + D_f + D_s = 1,03m + 1,7m + 1,26m = 3,99 m \quad (46)$$

$$\text{Potencia Soliquator} = P_c + P_f = 1330,80 + 82,26 = 1413,06 \text{ Watts} \quad (47)$$

$$\text{Potencia Soliquator} = 1413,06 \text{ Watts} = 1,41 \text{ kWh} \quad (48)$$

Del mismo modo para el diseño del filtro carbón y filtro de arena se emplearon el mismo método, a excepción del diseño de la altura de cada filtro ya que en cada uno varia el material empleado para su respectiva función en este caso retener diferentes componentes del agua, de igual forma se consideró un funcionamiento por gravedad y solo se va mostrar el cálculo del filtro de carbón y lo que varía en el diseño del filtro de arena.

1. Inicialmente se tienen los valores de entrada, de la hidráulica del filtrado en la *Tabla 43. Datos de entrada filtro carbón.*

Tabla 43. Datos de entrada filtro carbón.

Filtro de carbón		
Datos de entrada		
Variable	Valor	Unidad
Tasa de filtración	120	m/d
Medio filtrante	Carbón	
Duración	12	horas
Pérdida carga	30	cm
Drenaje	Falso fondo	-
Caudal de diseño	86	L/s
	0,086	m ³ /s
	7430,4	m ³ /d
Velocidad de lavado	1,17292	cm/s

Fuente: Los autores

2. Con los datos de entrada se calcularon el número de filtros, el caudal unitario, el área superficial y las dimensiones del diseño, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\text{Número filtros} = 0,44 * \sqrt{\text{Caudal diseño}} \quad (49)$$

$$\text{Número filtros} = 0,44 * \sqrt{7430,4 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}} = 3,79 = 4 \quad (50)$$

$$\text{Caudal unitario} = \frac{\text{Caudal diseño}}{\text{Número filtros}} = \frac{7430,4 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{4} = 1857,6 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \quad (51)$$

$$\text{Área superficial} = \frac{\text{Caudal unitario}}{\text{Tasa filtración}} = \frac{1857,6 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{120 \frac{\text{m}}{\text{d}}} = 15,48 \text{ m}^2 \quad (52)$$

$$\text{Lado del filtro} = \sqrt{\text{Área superficial}} = \sqrt{15,48 \text{ m}^2} = 3,93\text{m} = 4\text{m} \quad (53)$$

Tabla 44. Diseño filtro carbón.

1. Número de filtros	3,79	4
2. Caudal unitario	1857,6	m ³ /d
3. Área superficial requerida	15,48	m ²
4. Diseño cuadrado,	3,9345	m

Fuente: Los autores

3. Por otro lado, se establece la altura total del filtro, teniendo en cuenta diferentes variables que se consideraron, registradas en la *Tabla 45. Valores considerados para la altura total filtro carbón.*

Tabla 45. Valores considerados para la altura total filtro carbón.

5. Altura total del filtro		
Variable	Valor	Unidad
Altura falso fondo	0,15	m
Altura lecho en carbón	0,2	m
Lámina de agua sobre el carbón	0,4	m
Borde libre	0,15	m
Altura total del filtro	0,9	m

Fuente: Los autores.

4. Igualmente se realiza el cálculo necesario para hallar el caudal y volumen necesario para mantenimiento periódico del filtro, teniendo en cuenta que la velocidad de arrastre sale del respectivo análisis de granulometría del material filtrante, y asumiendo una porosidad de 0,45.

$$Vt = 10 * D_{60} = 10 * 0,426 * 1,6522 = 7,038 \frac{m}{min} \quad (54)$$

$$Vb = Vt * e^{4,5} = 17,038 \frac{m}{min} * 0,45^{4,5} \frac{m}{min} \quad (55)$$

$$Q_{lav} = \frac{V_{lav}}{100} * A_{sr} = \frac{1,173 \frac{cm}{s}}{100} * 15,48 m^2 = 0,182 \frac{m^3}{s} \quad (56)$$

$$V_{o lav} = Q_{lav} * t_{lav} = 0,182 \frac{m^3}{s} * 15 min * 60 s = 163,41 m^3 \quad (57)$$

Donde; *Vt*: Velocidad de arrastre
Vb: Velocidad ascensional
Asr: Área superficial requerida
Vlav: Velocidad de lavado
Vo lav: Volumen de lavado

t_{lav} : tiempo de lavado

Tabla 46. Caudal y volumen de lavado filtro carbón.

6. Caudal y volumen de lavado		
Variable	Valor	Unidad
Velocidad de lavado	1,173	cm/s
V _t	7,038	m/min
V _b	0,194	m/min
Q _{lav}	0,182	m ³ /s
Tiempo de lavado	15	min
Volumen lavado	163,41	m ³

Fuente: Los autores

5. Para terminar, se realiza el cálculo del volumen del filtro asumiendo un tiempo de filtración de 30 horas, para proceder a calcular el porcentaje de lavado necesario y verificar que no supere el 15%.

$$Volumen\ filtro = \frac{Caudal\ unitario}{24} = \frac{1857,6 \frac{m^3}{día} * 30}{24} = 2322m^3 \quad (58)$$

$$\% \text{ lavado} = \frac{Volumen\ lavado}{Volumen\ filtro} * 100 = \frac{163,41m^3}{2322m^3} * 100 = 7,03\% \quad (59)$$

Tabla 47. Volumen de filtración y porcentaje de lavado.

7. Volumen de filtrado y % de lavado		
Variable	Valor	Unidad
Volumen filtro	2322	m ³
Lavado	7,03752	%
Cumple < 15 %		

Fuente: Los autores

6. Como se mencionó en un principio para el diseño del filtro carbón, el diseño del filtro de arena es igual a este a excepción del medio filtrante ya que en este caso es la arena y para la altura del filtro se tienen en cuenta otros materiales que se presentan en la *Tabla 48. Valores considerados para la altura total filtro arena.*

Tabla 48. Valores considerados para la altura total filtro arena.

5. Altura total del filtro		
Variable	Valor	Unidad
Altura falso fondo	0,15	m
Altura lecho en carbón	0,2	m
Lámina de agua sobre la arena	0,4	m
Borde libre	0,15	m
Altura total del filtro	1	m

Fuente: Los autores

Por consiguiente, la última estructura en consideración de diseño en la PTAR de la empresa textil, son los suavizadores por los cuales se realizaron los siguientes procedimientos para dimensionar los dos reactores:

1. Asumir un valor de retención hidráulica de 30 min equivalente a 1800 segundos para proceder a calcular el volumen del tanque con la ecuación 60:

$$Volumen = Caudal * tiempo = 86 \frac{L}{s} * 1800s = 154800 L \quad (60)$$

$$Volumen = \frac{154800 L}{1000 L} = 154,8 m^3 \quad (61)$$

Tabla 49. Cálculo volumen suavizadores.

Cálculo del volumen que trabaja el tanque		
Variable	Valor	Unidad
Tiempo	30	min
	1800	s
Caudal	86	L/s
Volumen	154800	L
	154,8	m ³

Fuente: Los autores

2. Para las dimensiones de los dos reactores y con el volumen total se halla el volumen para cada reactor:

$$Volumen \text{ cada reactor} = \frac{154,8 m^3}{2} = 77,4 m^3 \quad (62)$$

$$\text{Diámetro cada reactor} = \sqrt[3]{\frac{4 * \text{volumen}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 77,4 \text{ m}^3}{\pi}} = 4,62\text{m} \quad (63)$$

Tabla 50. Dimensiones - suavizador

Dimensiones reactor, considerando h=diámetro=longitud		
Variable	Valor	Unidad
Volumen	77,4	m ³
Diámetro reactor	4,62	m

Fuente: Los autores

Por consiguiente, para poder estimar la energía requerida por la planta de tratamiento, se realiza el cálculo hidráulico con el fin de estimar una cantidad de bombas necesarias para poder superar la altura o distancia, que comprende el paso de una estructura a otra hasta la descarga final y la disposición de residuos en este caso lodos generados en la parte del soliquator (sedimentación), por lo cual fue indispensable para fácil guía el diseño en planta de la PTAR (*Figura 30. Esquema en planta - Planta de tratamiento residual industria textil.*), con su respectiva distribución y dimensiones.

En este caso se consideró que todo iba a trabajarse por medio de un equipo de bombeo, es decir una red presurizada para la cual se realizaron las siguientes estimaciones y cálculos:

1. Se consideró una altura estática desde el punto inicial del agua residual textil al primer proceso en este caso el hidrotamiz, discriminada de la siguiente manera:

Tabla 51. Altura estática bomba-hidrotamiz.

Altura estática	m
Borde libre	0,2
Altura pedestal	0,15
Altura eje bomba	0,15
Altura al tanque	2,3
Total altura estática	2,8

Fuente: Los autores

2. Del mismo modo se realizaron diferentes puntos de análisis para calcular la altura a superar mediante el paso de una estructura a otra, es decir; tanque a soliquator, soliquator a filtros, en donde para cada análisis se tuvo en cuenta la longitud horizontal la cual fue medida directamente de AutoCAD en los planos en planta y las longitudes verticales se estimaron de acuerdo a los cálculos realizados anteriormente.

Igualmente, se van a presentar una serie de fórmulas tipo utilizadas para el cálculo de las pérdidas en la tubería lo cual fue igual para todos los procesos que componen la planta de tratamiento:

$$\text{Área} = \frac{\pi}{4 * \emptyset^2} \quad (64)$$

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{Caudal}}{\text{Área}} \quad (65)$$

$$\text{Carga velocidad} = \frac{\text{Velocidad}^2}{2 * g} \quad (66)$$

$$NR = \frac{\emptyset * \text{Velocidad}}{\text{viscosidad cinemática}} \quad (67)$$

$$f = \left(\frac{1}{-2 \text{LOG}_{10} * \left(\frac{Ks}{3,7 * \emptyset} + \frac{2,5}{NR * f^{0,5}} \right)} \right)^2 \quad (68)$$

$$j = f * \frac{1}{\emptyset} * \frac{\text{Velocidad}^2}{2 * g} \quad (69)$$

$$J = j * \text{longitud total tubería} \quad (70)$$

$$\text{Pérdida por accesorios} = \Sigma Km * \text{Carga velocidad} \quad (71)$$

Donde; \emptyset : Diámetro interno tubería (m) (sacado catálogo PAVCO)
 g : Aceleración de la gravedad ($\frac{m}{s^2}$)
 NR : Número de Reynolds
 f : Factor fricción (ecuación Colebrook and white)
 j : Pérdida unitaria (m/m) (ecuación Darcy – Weisbach)
 J : Pérdida por fricción (m)

A continuación, se van a presentar 3 tipos de tablas donde se registran los cálculos hidráulicos de cada tramo estimado con sus respectivas pérdidas en las tuberías con las ecuaciones anterior planteadas, otra tabla con los accesorios considerados y por ultimo una tabla con la altura dinámica a superar y así determinar el equipo de bombeo necesario para presurizar la red. Además, para todas las estructuras se consideró una tubería de diámetro de 10 pulgadas y se sacó las especificaciones de la tubería del catálogo de PAVCO, los tramos se consideraron de la siguiente manera:

2.1. Tramo bomba – Tanque homogenización.

Tabla 52. Cálculos hidráulicos Bomba inicial - Tanque homogenización.

Tramo Bomba -Tanque homogenización		
Longitud horizontal tubería	19,74	m
Longitud vertical	2,5	m
Longitud total	22,24	m
Pérdidas en la tubería		
Diámetro nominal	10	in
Diámetro interno	250	mm
	0,25	m
Área	0,049	m ²
Caudal	0,086	m ³ /s
Velocidad	1,752	m/s
Carga velocidad	0,156	m
Ks PVC	0,0015	mm
	0,0000015	m
Número de Reynolds	479206,13	Régimen turbulento
Factor fricción(ƒ)	0,0133	-
	1,0002	-
Pérdida unitaria (j)	0,00836	m/m
Pérdida por fricción (J)	0,1858	m
Σ km	7,62	-
Pérdida por accesorios	1,192	m

Fuente: Los autores.

Tabla 53. Inventario accesorios tramo Bomba inicial - Tanque homogenización.

Inventario accesorios					
Accesorio	Especificaciones		Cantidad	Km	Total
	Tipo	Material			
Tees dobles	-	PVC	3	0,5	1,5
Codo	radio medio 90°	PVC	3	0,8	2,4
Válvula	de cheque -cortina	Cu	1	2,5	2,5
Válvula	de compuerta totalmente abierta	Cu	1	0,2	0,2
Entrada	recta tope	PVC	1	0,5	0,5
Ampliaciones	-	PVC	1	0,52	0,52
				ΣKm	7,62

Fuente: Los autores.

Tabla 54. Altura dinámica a superar tramo Bomba inicial - Tanque homogenización.

Altura a superar	12,7283	m
Pérdida por fricción	0,1858	m
Pérdida por accesorios	1,192	m
Altura estática	2,8	m

Fuente: Los autores.

2.2. Tramo Tanque homogenización –Soliquator

Tabla 55. Cálculos hidráulicos Tanque homogenización-Soliquator.

Tramo Tanque Homogenización - Soliquator		
Longitud horizontal tubería	12,39	m
Longitud vertical	3	m
Longitud total	15,39	m
Pérdidas en la tubería		
Pérdida unitaria (j)	0,00836	m/m
Pérdida por fricción (J)	0,1286	m
Σ km	9,60	-
Pérdida por accesorios	1,502	m

Fuente: Los autores.

Tabla 56. Inventario accesorios tramo Tanque homogenización - Soliquator.

Inventario accesorios					
Accesorio	Especificaciones		Cantidad	Km	Total
	Tipo	Material			
Codo	radio medio 90°	PVC	2	0,8	1,6
Entrada	-	PVC	6	0,5	3
Salidas	-	PVC	5	1	5
				ΣKm	9,60

Fuente: Los autores.

Tabla 57. Altura dinámica a superar tramo Tanque homogenización -Soliquator.

Altura a superar	14,3593	m
Pérdida por fricción	0,1286	m
Pérdida por accesorios	1,502	m
Altura estática	0	m

Fuente: Los autores.

- 2.3.** Tramo Soliquator – Filtro carbón, para este caso se consideran dos tramos de este mismo proceso, ya que tienen dos entradas. Por lo tanto, se deben considerar estas alturas que la bomba debe superar desde un inicio.

Tabla 58. Cálculos hidráulicos Tanque Soliquator -Filtro carbón.

Tramo Soliquator - Filtro carbón		
Longitud horizontal tubería	25,04	m
Longitud vertical	1	m
Longitud total	26,04	m
Pérdidas en la tubería		
Pérdida unitaria (j)	0,00836	m/m
Pérdida por fricción (J)	0,2176	m
Σ km	10,80	-
Pérdida por accesorios	1,690	m

Fuente: Los autores.

Tabla 59. Inventario de accesorios tramo Soliquator- Filtro carbón.

Inventario accesorios					
Accesorio	Especificaciones		Cantidad	Km	Total
	Tipo	Material			
Tee	paso de lado	PVC	1	1,8	1,8
Codo	radio medio 90°	PVC	5	0,8	4
Entrada	-	PVC	4	0,5	2
Salidas	-	PVC	3	1	3
				ΣKm	10,80

Fuente: Los autores.

Tabla 60. Altura dinámica a superar tramo Soliquator -Filtro carbón.

Altura a superar	16,2670	m
Pérdida por fricción	0,2176	m
Pérdida por accesorios	1,690	m
Altura estática	0	m

Fuente: Los autores.

Tabla 61. Cálculos hidráulicos Tanque Soliquator - Filtro carbón.

Tramo Soliquator - Filtro carbón		
Longitud horizontal tubería	27,22	m
Longitud vertical	0	m
Longitud total	27,22	m
Pérdidas en la tubería		
Pérdida unitaria (j)	0,00836	m/m
Pérdida por fricción (J)	0,2275	m
Σ km	14,00	-
Pérdida por accesorios	2,191	m

Fuente: Los autores.

Tabla 62. Inventario de accesorios tramo Soliquator- Filtro carbón.

Inventario accesorios					
Accesorio	Especificaciones		Cantidad	Km	Total
	Tipo	Material			
Tee	paso de lado	PVC	1	1,8	1,8
Codo	radio medio 90°	PVC	4	0,8	3,2
Entrada	-	PVC	6	0,5	3
Salidas	-	PVC	6	1	6
				ΣKm	14,00

Fuente: Los autores.

Tabla 63. Altura dinámica a superar tramo Soliquator -Filtro carbón.

Altura a superar	18,6853	m
Pérdida por fricción	0,2275	m
Pérdida por accesorios	2,191	m
Altura estática	0	m

Fuente: Los autores.

- 2.4. Tramo Filtro carbón – Filtro arena, para este caso se consideran dos tramos de este mismo proceso ya que tiene dos entradas y por tanto se deben considerar estas alturas que debe superar la bomba desde un inicio.

Tabla 64. Cálculos hidráulicos Filtro carbón - Filtro arena.

Tramo Filtro carbón - Filtro arena		
Longitud horizontal tubería	27,22	m
Longitud vertical	0	m
Longitud total	27,22	m
Pérdidas en la tubería		
Pérdida unitaria (j)	0,00836	m/m
Pérdida por fricción (J)	0,2275	m
Σ km	9,00	-
Pérdida por accesorios	1,408	m

Fuente: Los autores

Tabla 65. Inventario accesorios tramo Filtro carbón - Filtro arena.

Inventario accesorios					
Accesorio	Especificaciones		Cantidad	Km	Total
	Tipo	Material			
Tee	paso de lado	PVC	2	1,8	3,6
Codo	radio medio 90°	PVC	3	0,8	2,4
Entrada	-	PVC	6	0,5	3
Salidas	-	PVC	6	1	6
				ΣKm	9,00

Fuente: Los autores

Tabla 66. Altura dinámica a superar tramo Filtro carbón - Filtro arena.

Altura a superar	20,3212	m
Pérdida por fricción	0,2275	m
Pérdida por accesorios	1,408	m
Altura estática	0	m

Fuente: Los autores

Tabla 67. Cálculos hidráulicos Filtro carbón - Filtro arena.

Tramo Filtro carbon - Filtro arena		
Longitud horizontal tubería	6,89	m
Longitud vertical	2	m
Longitud total	8,89	m
Pérdidas en la tubería		
Pérdida unitaria (j)	0,00836	m/m
Pérdida por fricción (J)	0,0743	m
Σ km	6,00	-
Pérdida por accesorios	0,939	m

Fuente: Los autores

Tabla 68. Inventario accesorios tramo Filtro carbón - Filtro arena.

Inventario accesorios					
Accesorio	Especificaciones		Cantidad	Km	Total
	Tipo	Material			
Tee	paso de lado	PVC	1	1,8	1,8
Codo	radio medio 90°	PVC	2	0,8	1,6
Salidas	-	PVC	6	1	6
			ΣKm		6,00

Fuente: Los autores

Tabla 69. Altura dinámica total a superar tramo Filtro carbón - Filtro arena.

Altura a superar	21,3345	m
Pérdida por fricción	0,0743	m
Pérdida por accesorios	0,939	m
Altura estática	0	m

Fuente: Los autores

Ya para la parte de los suavizadores se consideró que su funcionamiento era por gravedad tanto de ahí, hasta la descarga final al cuerpo receptor y al tanque de almacenamiento del porcentaje de recirculación que emplea la empresa textil para otros usos o para el mismo proceso textil.

3. Equipo de bombeo, para el cálculo de potencia de la bomba requerida como se mencionó y mostro anteriormente, lo que se quiso fue evaluar la energía que se gasta la planta de tratamiento para poder realizar su respectivo

funcionamiento, y por tal motivo se evaluó el requerimiento energético de punto a punto, es decir con sus longitudes y a su vez conocer la altura dinámica total y conocer el equipo de bombeo requerido.

- 3.1.** Inicialmente se calcula la potencia mecánica teoría de la bomba ya que se asume que tiene una eficiencia del 95%, con la ecuación 72:

$$P_{mt} = \frac{CB * ADT * d}{76 * n} = \frac{86 \frac{L}{s} * 21,33m * 0,9971 \frac{kg}{L}}{76 * 0,95} = 25,33 \text{ hP} \quad (72)$$

Donde; *Pmt*: Potencia mecánica teórica (hP)
CB: Caudal de bombeo ($\frac{L}{s}$)
ADT: Altura dinámica total (m) (altura a superar)
d: Densidad del agua ($\frac{kg}{L}$)
n : Eficiencia de la bomba

Tabla 70. Valores para el cálculo potencia mecánica teórica.

Potencia mecánica teórica	25,33857608	hP
Potencia mecánica teórica aprox.	20	hP
Densidad agua	0,9971	kg/L
Eficiencia	0,95	-
T°- Medellín	25	°C

Fuente: Los autores

- 3.2.** Ya con los valores de la potencia calculados se procedió a buscar un proveedor o fabricante que tenga las características de la bomba calculadas, de la cual se tomó el modelo de bomba CM80-16OB (AGP bomba 2015), sus características están registrados en la *Gráfica 31. Características bomba requerida para bombeo PTAR industria textil.*

4. No obstante, se considera una bomba a la salida de los tanques Soliquator para el transporte de los desechos; lodos generados, en este caso se consideró una bomba de 1 hP necesaria para transportar estos desechos.
5. Finalmente se procede a realizar una tabla con la energía requerida por cada uno de los procesos internos necesaria para la circulación del agua por toda la PTAR, considerando también los desechos.

Tabla 72. Energía requerida planta tratamiento agua residual textil.

Proceso	Conversión unidades			
Bombas proceso completo	25	hP	18,64	Kw
Bombas lodos	1		0,745	
Floculador	0,11		0,08	
Coagulador	1,8		1,33	
Total energía			20,80	Kw

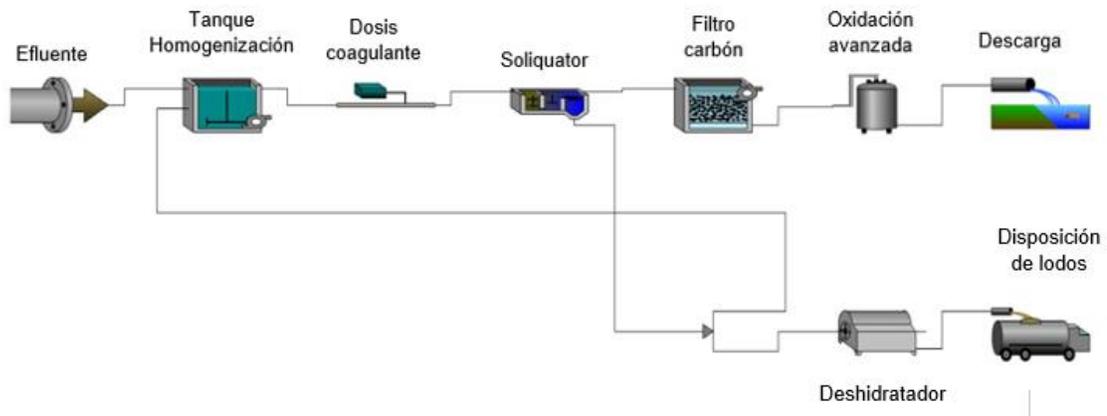
Fuente: Los autores

9.5. MODIFICACIÓN DEL SISTEMA CONVENCIONAL CON EL PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA

Lo que se quiso proponer para esta propuesta de tratamiento, fue el remplazo de alguna estructura ya existente por el proceso de oxidación avanzada, ya que se verificó que los valores de salida cumplían con la Resolución 0631 de 2015 calidad de los vertimientos y no se vio la necesidad de implementar, si no de modificar un proceso convencional por uno de oxidación avanzada y con esto evaluar que tanto reduce o aumentan los parámetros de calidad del agua en la descarga a comparación del proceso convencional ya implementado por la planta, que para este caso se remplazó el filtro de arena, ya que fue el más óptimo como se evidencia en la

Figura 31. Esquema del sistema convencional con el proceso de oxidación avanzada.

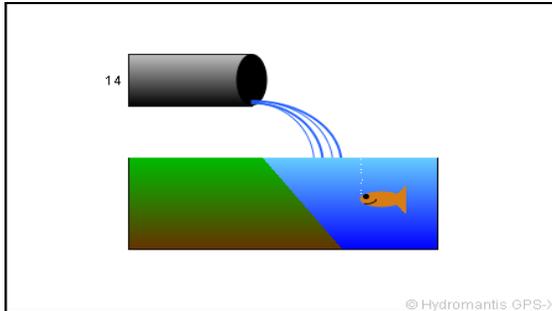
Figura 31. Esquema del sistema convencional con el proceso de oxidación avanzada.
Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.



Fuente: Simulación programa GPS-X
7.0.1.

➤ Descarga

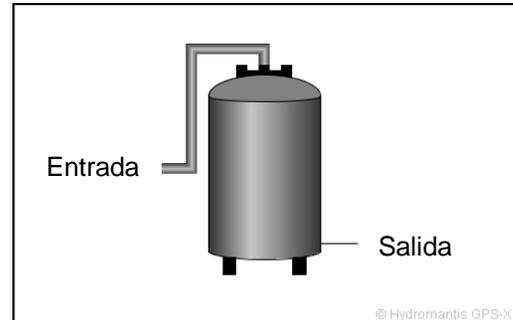
Figura 32. Descarga (POA).



Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

➤ Filtro de Arena

Figura 33. Proceso de Oxidación Avanzada.



Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

Tabla 73. Resultados de la descarga en GPS-X (POA).

DESCARGA		
PARÁMETRO	ENTRADA	UNIDAD
Caudal	2038,25	m ³ /d
Sólidos Suspendedos Totales	27,06	mg/L
Sólidos Suspendedos Volátiles	3,19	mg/L
DBO ₅	84,28	mg/L
DQO	303,53	mg/L
Amoniac N	0,53	mgN/L
Nitrato N	0,00060005	mgN/L
Nitrato N	0,00073	mgN/L
Nitrógeno Total Aparente	10,067	mgN/L
Nitrógeno Total	10,068	mgN/L
Soluble PO ₄ -P	0,097	mgP/L
Fósforo Total	1,994	mgP/L
Alcalinidad	113,658	mgCaCO ₃ /L
pH	7	-

Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

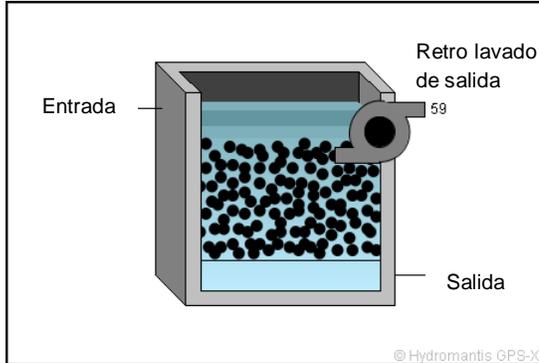
Tabla 74. Resultados del Proceso de Oxidación Avanzada.

OXIDACIÓN AVANZADA			
PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA	UNIDAD
Caudal	2038,25	2038,25	m ³ /d
Sólidos Suspendedos Totales	27,06	27,06	mg/L
Sólidos Suspendedos Volátiles	3,19	3,19	mg/L
DBO ₅	84,84	84,28	mg/L
DQO	305,53	303,53	mg/L
Amoniac N	0,47	0,53	mgN/L
Nitrato N	0,00060	0,00060	mgN/L
Nitrato N	0,00073	0,00073	mgN/L
Nitrógeno Total Aparente	10,07	10,07	mgN/L
Nitrógeno Total	10,07	10,07	mgN/L
Soluble PO ₄ -P	0,08	0,10	mgP/L
Fósforo Total	1,99	1,99	mgP/L
Alcalinidad	113,89	113,66	mgCaCO ₃ /L
pH	7	7	-

Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

➤ Filtro de carbón

Figura 34. Filtro de carbón (POA).



Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

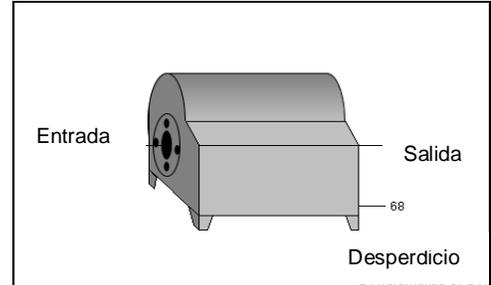
Tabla 75. Resultados del Filtro de carbón en GPS-X (POA).

FILTRO DE CARBÓN				
PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA	RETROLAVADO	UNIDAD
Caudal	2063.25	2038.25	25	m ³ /d
Sólidos Suspendidos Totales	659.41	27.06	-	mg/L
Sólidos Suspendidos Volátiles	72.46	3.19	-	mg/L
DBO ₅	244.75	84.84	-	mg/L
DQO	629.00	305.53	-	mg/L
Amoniaco N	2.046E-09	0.474	-	mgN/L
Nitrito N	2.046E-09	0.0006001	-	mgN/L
Nitrato N	3.3	0.00073	-	mgN/L
Nitrógeno Total Aparente	16.8724	10.067	-	mgN/L
Nitrógeno Total	20.172	10.068	-	mgN/L
Soluble PO ₄ -P	0.01	0.085	-	mgP/L
Fósforo Total	3.95	1.99	-	mgP/L
Alcalinidad	0.0061	113.886	-	mgCaCO ₃ /L
pH	7	7	-	-

Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1

➤ Deshidratador

Figura 35. Deshidratador (POA).



Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

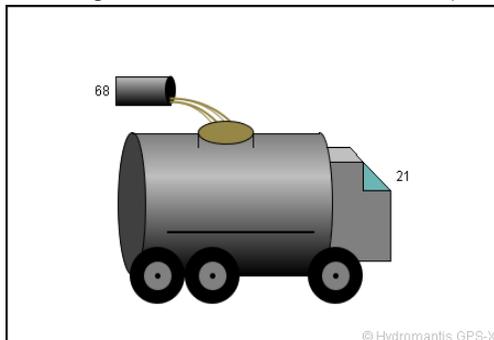
Tabla 76. Resultados del deshidratador en GPS-X (POA).

DESHIDRATADOR				
PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA	DESPERDICIO	UNIDAD
Caudal	0.75	0.735	0.015	m ³ /d
Sólidos Suspendidos Totales	5480613.2	1700150.5	190723283.3	mg/L
DQO	1034979.3	382445.65	33009126.94	mg/L
Amoniaco N	2.046E-09	2.046E-09	2.04573E-09	mgN/L
Soluble PO ₄ -P	0.01	0.01	0.01	mgP/L
Alcalinidad	0.00612	0.00612	0.00612	mgCaCO ₃ /L
pH	7	7	7	-

Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

➤ Eliminación de lodos

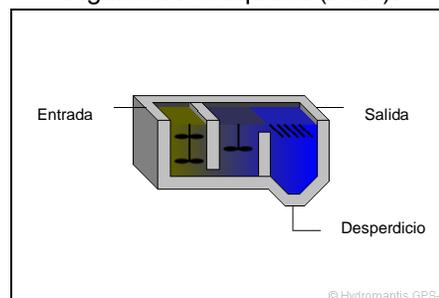
Figura 36. Eliminación de lodos (POA).



Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

➤ Soliquator

Figura 37. Soliquator (POA).



Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

Tabla 77. Resultados de la eliminación de lodos (POA).

ELIMINACIÓN DE LODOS		
PARÁMETRO	ENTRADA	UNIDAD
Caudal	0,015	m ³ /d
Sólidos Suspendedos Totales	190723283	mg/L
Sólidos Suspendedos Volátiles	18837355	mg/L
DBO ₅	2153714,5	mg/L
DQO	33009127	mg/L
Amoniaco N	2,046E-09	mgN/L
Nitrito N	2,046E-09	mgN/L
Nitrato N	3,3	mgN/L
Nitrógeno Total Aparente	1875927,1	mgN/L
Nitrógeno Total	1875930,4	mgN/L
Soluble PO ₄ -P	0,01	mgP/L
Fósforo Total	512766,3	mgP/L
Alcalinidad	0,00612	mgCaCO ₃ /L
pH	7	-

Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

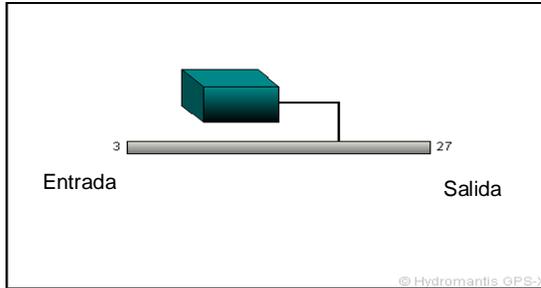
Tabla 78. Resultados del Soliquator del sistema en GPS-X (POA).

SOLIQUATOR				
PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA	DESPERDICIO	UNIDAD
Caudal	2064,75	2063,25	1,5	m ³ /d
Sólidos Suspendedos Totales	4640,49	659,41	5480613,15	mg/L
DQO	1380,44	629,001	1034979,27	mg/L
Amoniaco N	2,046E-09	2,046E-09	2,04573E-09	mgN/L
Soluble PO ₄ -P	0,01	0,01	0,01	mgP/L
Alcalinidad	0,00612	0,00612	0,00612	mgCaCO ₃ /L
pH	7	7	7	-

Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

➤ Dosis de coagulante

Figura 38. Dosis de coagulante (POA).



Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

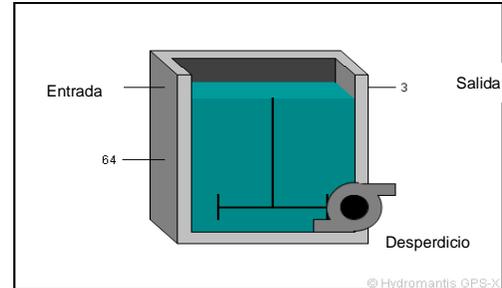
Tabla 79. Resultados de la dosis de coagulante.

DOSIS DE COAGULANTE			
PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA	UNIDAD
Caudal	2064,75	2064,75	m ³ /d
Dosis del metal	-	1651,8	kg/d
Concentración del metal	-	800	mg/L
Sólidos Suspendedos Totales	2203,48	4640,49	mg/L
Soluble PO ₄ -P	1,50	0,01	mgP/L
Fósforo Total	16,66	16,66	mgP/L
Alcalinidad	0,92	0,0061	mgCaCO ₃ /L
pH	7	7	-

Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

➤ Tanque de homogenización

Figura 39. Tanque homogenización.



Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1.

Tabla 80. Resultados del tanque de homogenización.

TANQUE DE HOMOGENIZACIÓN				
PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA	DESPERDICIO	UNIDAD
Caudal	2064	2064,75	0,75	m ³ /d
Sólidos Suspendedos Totales	211,10	2203,48	-	mg/L
Sólidos Suspendedos Volátiles	168,88	387,80	-	mg/L
DBO ₅	290,56	333,65	-	mg/L
DQO	1004,45	1380,4357	-	mg/L
Amoniaco N	0	2,05E-09	-	mgN/L
Nitrógeno Total Aparente	40,16	63,47	-	mgN/L
Fósforo Total	10,3	16,657	-	mgP/L
Alcalinidad	0,92	0,92	-	mgCaCO ₃ /L
pH	7	7	-	-

Fuente: Simulación programa GPS-X 7.0.1

9.5.1. Comparación valores en la descarga del agua residual con el sistema convencional y el sistema con oxidación avanzada

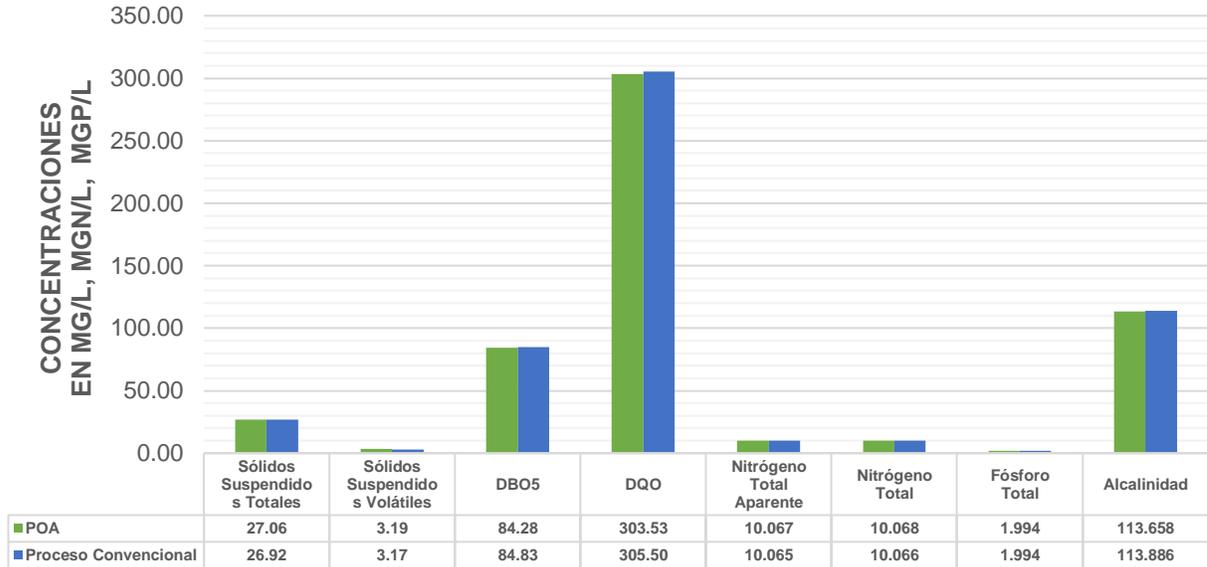
Tabla 81. Comparación de datos finales en descarga de GPS-X 7.0.1.

COMPARACIÓN DE LA DESCARGA DE PROCESOS				
PARÁMETRO	DESCARGA		DIFERENCIA	UNIDAD
	POA	Convencional		
Caudal	2038,25	1997,485	40,765	m ³ /d
Sólidos Suspendidos Totales	27,06	26,92	0,14	mg/L
Sólidos Suspendidos Volátiles	3,19	3,17	0,02	mg/L
DBO ₅	84,28	84,83	-0,56	mg/L
DQO	303,53	305,5	-1,97	mg/L
Amoniaco N	0,53	0,47	0,06	mgN/L
Nitrito N	0,00060005	0,00060005	0	mgN/L
Nitrato N	0,00073	0,00073	0	mgN/L
Nitrógeno Total Aparente	10,067	10,065	0,002	mgN/L
Nitrógeno Total	10,068	10,066	0,002	mgN/L
Soluble PO ₄ -P	0,097	0,085	0,012	mgP/L
Fósforo Total	1,994	1,994	0	mgP/L
Alcalinidad	113,658	113,886	-0,229	mgCaCO ₃ /L
pH	7	7	0	-

Fuente: Los autores.

Gráfica 32. Gráfica de comparación entre la descarga en el Sistema convencional y la descarga del sistema con el Proceso de Oxidación Avanzada propuesto.

DESCARGA DEL SISTEMA DE LA PTAR CONVENCIONAL VS SISTEMA DE PROPUESTA CON EL POA



Fuente: Los autores.

9.5.2. Porcentaje remoción

Para este caso contando con los valores iniciales de entrada se realiza una regla de tres para sacar los porcentajes de remoción por parte del proceso convencional como el proceso de oxidación en la descarga del programa GPS-X 7.0.1.

$$\% \text{ remoción} = \frac{\text{Entrada} - \text{Salida}}{\text{Entrada}} * 100 \quad (73)$$

Tabla 82. Porcentajes de remoción del proceso convencional y el POA vs los valores de entrada del programa GPS-X 7.0.1.

PARAMETRO	VALORES			Porcentaje remoción	
	ENTRADA	SALIDA		POA (%)	Convencional (%)
	Caracterización inicial	POA	Convencional		
Caudal (m ³ /d)	2064	2038,25	1997,485	1,248	3,223
DQO (mg/L)	1004,45	303,53	305,5	69,781	69,585
Nitrógeno total (mgN/L)	21	10,068	10,066	52,057	52,067
Fósforo total (mgP/L)	10,3	1,994	1,994	80,641	80,641
Nitrato (mgN/L)	3,3	0,00073	0,00073	99,978	99,978

Fuente: Los autores.

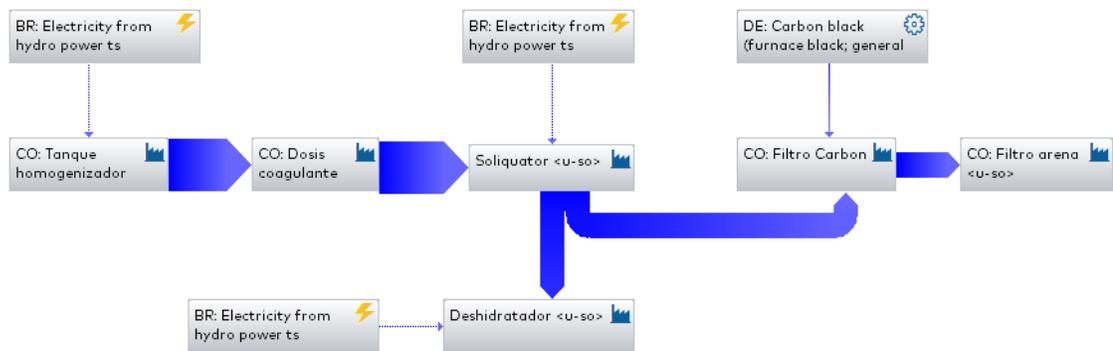
Como se evidencia en la *Tabla 82. Porcentajes de remoción del proceso convencional y el POA vs los valores de entrada del programa GPS-X 7.0.1.*, los porcentajes de remoción de la concentración de los parámetros no difieren entre sí, es decir que, el adicionar un Proceso de Oxidación Avanzada al sistema, remueve de manera eficiente los compuestos, un poco más en algunos parámetros que el sistema convencional.

Ya teniendo los resultados de las dos hipótesis y el análisis desarrollado, se registran los datos en GaBi para el diseño del análisis de ciclo de vida, mostrado a continuación.

9.6. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

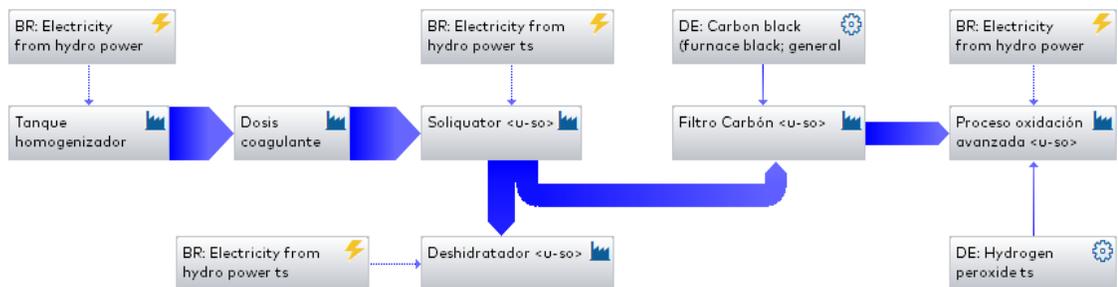
En el presente ítem, se identifica la secuencia de los procesos, el sentido de flujo del sistema y el camino que lleva cada proceso a evaluar en la planta de tratamiento de la industria textil, tanto el sistema convencional como la modificación del mismo por el POA en el software GaBi Education, para el análisis y conocimiento de la magnitud de los impactos ambientales generados en cada sistema.

Figura 40. Esquema - Planta de tratamiento convencional.



Fuente: Simulación programa GaBi Education.

Figura 41. Esquema - Planta de tratamiento con el POA.



Fuente: Simulación programa GaBi Education.

Para la simulación con el proceso de tratamiento de oxidación avanzada en la *Figura 41. Esquema - Planta de tratamiento con el POA.*, se tuvo en cuenta las dosis, multiplicando las concentraciones por el caudal de 86 m³/h para obtener los flujos másicos en [kg/día] para ingresar al programa GaBi. Los datos de UV y ozono fueron extraídos de la propuesta de diseño para un sistema de tratamiento y reutilización de efluentes textiles combinando tecnologías convencionales con el proceso de oxidación avanzada (O₃ /H₂O₂ /UV) de Alfonso Moreno (et al. 2015), con dosis de 18,4 mg/L para el ozono. Para el valor de UV proporcionaban datos de longitud de onda de 240 nm, por lo cual se buscó la energía requerida para una lámpara de luz ultravioleta de 240 nm con valores entre 120 y 200 watts (Lenntech BV 2016), tomando así un valor de 150 Watts.

Como se puede evidenciar, se realizaron varias referencias bibliográficas para obtener los valores de las dosis adecuadas estudiadas por cada uno de los repositorios citados. Por lo tanto, para la parte del peróxido de hidrogeno se realizó el procedimiento con una concentración de 4.950 mg/L (José Blanco Jurado 2009). Además, se hizo una nueva consulta para la dosis del óxido de zinc donde se tomó el valor de 500 mg/L del repositorio de Síntesis verde de nanopartículas de óxido de zinc (Rambabu et al. 2021).

10. EVALUACIÓN IMPACTO AMBIENTAL

El software GaBi al manejar diferentes bases de datos, también evalúa de diferentes formas los impactos ambientales. Una de estas formas, que a elección se tomó, es la evaluación de la “Huella ambiental”, conocida en el software como *Environmental Footprint 2.0*, donde se analizan los siguientes impactos con los respectivos resultados arrojados por el software:

Tabla 83. Resultados de los impactos ambientales en la simulación del sistema convencional en GaBi Education.

		SISTEMA DE TRATAMIENTO CONVENCIONAL																
CAUSAL	IMPACTO AMBIENTAL	Acidificación terrestre y acuática [Mol de H ⁺ eq.]	Cambio Climático [kg CO ₂ eq.]	Efectos en la Salud Humana cancerígenos [CTUh]	Cambio Climático (biogénico) [kg CO ₂]	Cambio Climático (fósil) [kg CO ₂ eq.]	Cambio climático (Cambio del uso de la tierra) [kg CO ₂ eq.]	Eutrofización Terrestre [Mol de N eq.]	Radiación Ionizada - Salud humana [kBq U235 eq.]	Uso de Suelo [Pt.]	Toxicidad humana (no cancerígena) [CTUh]	Agotamiento de la Capa de Ozono [kg CFC-11 eq.]	Formación fotoquímica de Ozono [kg NMVOC Equiv.]	Portadores de energía de Uso de recursos (Energía) [MJ]	Uso de Recursos minerales y metales [kg Sb eq.]	Inorgánicos respiratorios [PM2.5 eq.]	Ecotoxicidad de agua dulce [CTUe]	Escasez de agua [m ³ eq.]
		Electricidad soliquator	8,10E-03	339	1,60E-07	5,93E-03	339	2,89E-03	2,46E-02	5,72E-02	80,700	5,79E-07	1,48E-14	6,22E-03	21,30	6,32E-05	1,37E-07	0,184
Electricidad deshidratador	1,11E-05	0,467	2,21E-10	8,15E-06	0,467	3,97E-06	3,38E-05	7,87E-05	0,111	7,96E-10	2,04E-17	8,56E-06	0,0293	8,70E-08	1,88E-10	0,000253	0,168	
Electricidad resto de procesos	1,47E-04	6,17	2,92E-09	1,08E-04	6,17	5,25E-04	4,47E-04	1,04E-03	1,470	1,05E-08	2,70E-16	1,13E-04	0,388	1,15E-06	2,49E-09	0,00335	2,22	
Carbón	5,12E-04	0,215	3,64E-09	1,10E-03	0,214	9,18E-05	3,37E-04	3,26E-03	0,441	2,72E-08	1,01E-15	1,82E-04	5,79	2,48E-08	2,10E-08	0,073	0	
Total	8,77E-03	346	1,67E-07	7,14E-03	346	3,04E-03	2,54E-02	6,16E-02	82,700	6,17E-07	1,61E-14	6,53E-03	27,50	6,45E-05	1,60E-07	0,261	124	

Fuente: Modificado de la simulación del software GaBi Education.

Tabla 84. Resultados de los impactos ambientales en la simulación del sistema convencional en GaBi Education (continuación).

SISTEMA CONVENCIONAL			
IMPACTO AMBIENTAL	Eutrofización de agua dulce [kg P eq.]	Eutrofización marina [kg N eq.]	IMPACTO AMBIENTAL
CAUSAL			CAUSAL
Electricidad	3,81E-06	83	Electricidad todo el proceso
Filtro arena	-0,656	0,00225	Electricidad soliquator
Filtro carbón	-3,37	4,09E-05	Filtro arena
Tanque homogenizador	26,2	-2,38	Filtro carbón
Carbón	3,00E-07	-10,9	Tanque homogenizador
Resto	7,46E-08	96,2	Resto
Total	22,2	165,9223	Total

Fuente: Modificado de la simulación del software GaBi Education.

Tabla 85. Resultados de los impactos ambientales en la simulación del sistema con el POA en GaBi Education.

SISTEMA CON EL PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA																	
IMPACTO AMBIENTAL	Acidificación terrestre y acuática [Mol de H ⁺ eq.]	Cambio Climático [kg CO ₂ eq.]	Efectos en la Salud Humana cancerígenos [CTUh]	Cambio Climático (biogénico) [kg CO ₂ eq.]	Cambio Climático (fósil) [kg CO ₂ eq.]	Cambio climático (Cambio del uso de la tierra) [kg CO ₂ eq.]	Eutrofización Terrestre [Mol de N eq.]	Radiación Ionizada - Salud humana [kBq U235 eq.]	Uso de Suelo [Pt.]	Toxicidad humana (no cancerígena) [CTUh]	Agotamiento de la Capa de Ozono [kg CFC-11 eq.]	Formación fotoquímica de Ozono [kg NMVOC Equiv.]	Portadores de energía de Uso de recursos (Energía) [MJ]	Uso de Recursos minerales y metales [kg Sb eq.]	Inorgánicos respiratorios [PM2.5 eq.]	Ecotoxicidad de agua dulce [CTUe]	Escasez de agua [m ³ eq.]
CAUSAL																	
Electricidad soliquator	1,06E-03	44,2	2,09E-04	7,72E-04	44,2	3,76E-04	3,20E-03	7,46E-03	10,500	7,54E-08	1,93E-15	8,11E-04	2,78	8,24E-06	1,78E-08	0,024	15,9
Electricidad deshidratador	8,00E-05	3,35	1,58E-04	5,85E-05	3,350	2,85E-03	2,43E-04	5,65E-04	0,796	5,71E-09	1,46E-16	6,14E-05	0,2100	6,24E-07	1,35E-09	0,001820	1,2
Electricidad resto de procesos	6,20E-02	2,60E+03	1,23E-02	4,53E-02	2,60E+03	2,21E-02	1,88E-01	4,38E-01	617	4,43E-06	1,10E-13	4,76E-02	163,000	4,84E-04	1,05E-06	1,41000	933
Carbón	3,42E-03	1,44	2,43E-04	7,35E-03	1,43	6,12E-04	2,24E-03	2,18E-02	2,940	1,81E-07	6,76E-15	1,21E-03	38,60	1,65E-07	1,40E-07	0,486	0,0595
Peróxido de hidrógeno	8,03E+01	8,69E+04	2,14E-04	4,35E+02	8,64E+04	6,81E+01	2,83E+02	2,46E+03	3,44E+05	2,13E-02	8,01E-10	7,52E+01	1,32E+06	1,34E-02	5,80E-04	2,72E+03	696
Resto	3,95E-06	1,66E-01	7,82E-04	2,89E-06	1,66E-01	1,41E-06	1,25E-05	2,79E-05	3,94E-02	2,82E-10	7,24E-18	3,03E-06	1,04E-02	3,08E-08	6,67E-11	9,98E-05	0,019
Total	8,04E+01	8,95E+04	2,15E-04	4,35E+02	8,90E+04	6,82E+01	2,84E+02	2,46E+03	344000	2,13E-02	8,01E-10	7,52E+01	1320000,00	1,39E-02	5,81E-04	2720,000	1650

Fuente: Modificado de la simulación del software GaBi Education.

Tabla 86. Resultados de los impactos ambientales en la simulación del sistema con el POA en GaBi Education (continuación).

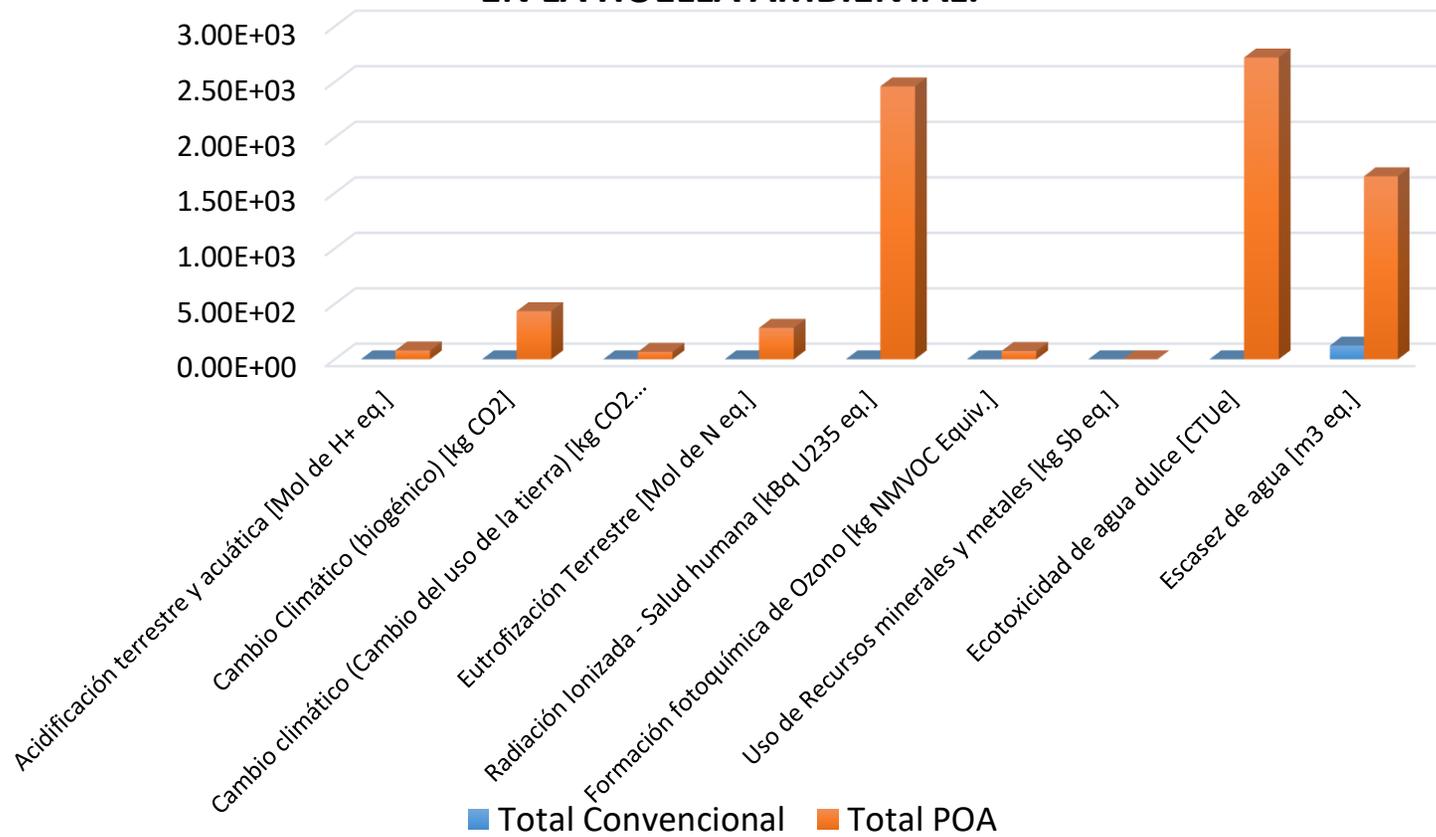
SISTEMA CON EL PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA			
IMPACTO AMBIENTAL	Eutrofización de agua dulce [kg P eq.]	Eutrofización marina [kg N eq.]	IMPACTO AMBIENTAL
CAUSAL			CAUSAL
Electricidad todo el proceso	2,92E-05	1,72E-02	Electricidad todo el proceso
Filtro carbón	-26,9	-71,9	Filtro carbón
Tanque homogenizador	188	689	Tanque homogenizador
Carbón	2,00E-06	2,68E+01	Peróxido de hidrogeno
Resto	5,36E-07	5,28E-04	Resto
Peróxido de hidrogeno	2,34E-01	6,59E-01	Proceso oxidación avanzada
Total	161	645	Total

Fuente: Modificado de la simulación del software GaBi Education.

Con las tablas anteriores, se hacen las siguientes gráficas para obtener un mejor detalle y hacer las respectivas comparaciones.

Gráfica 33. Resultados de los impactos totales del sistema convencional y el sistema con el POA.

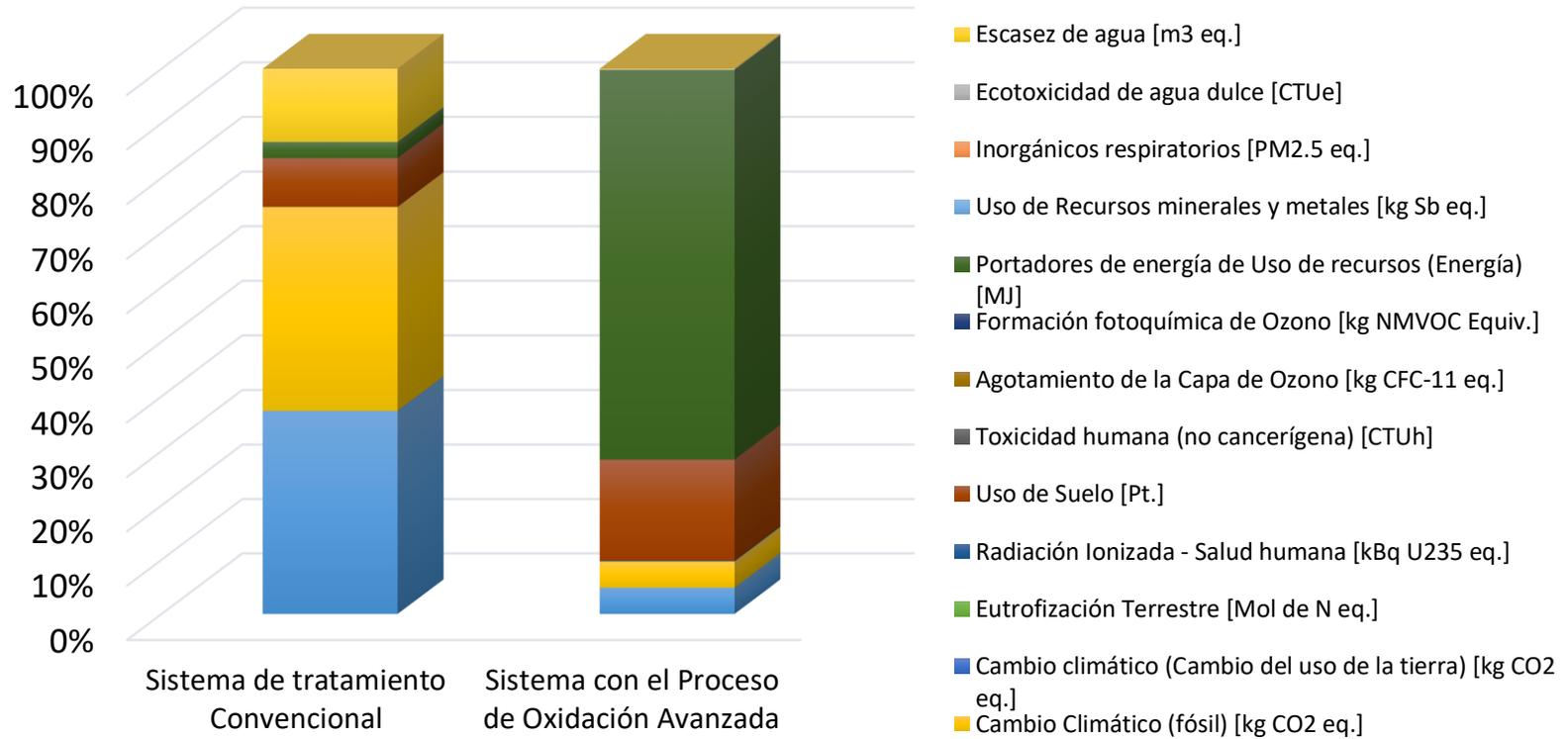
RESULTADOS RELEVANTES DE LOS TOTALES ENTRE EL SISTEMA CONVENCIONAL Y CON EL POA POR CADA IMPACTO AMBIENTAL EN LA HUELLA AMBIENTAL.



Fuente: Los autores.

Gráfica 34. Impactos totales en los sistemas evaluados, en porcentajes.

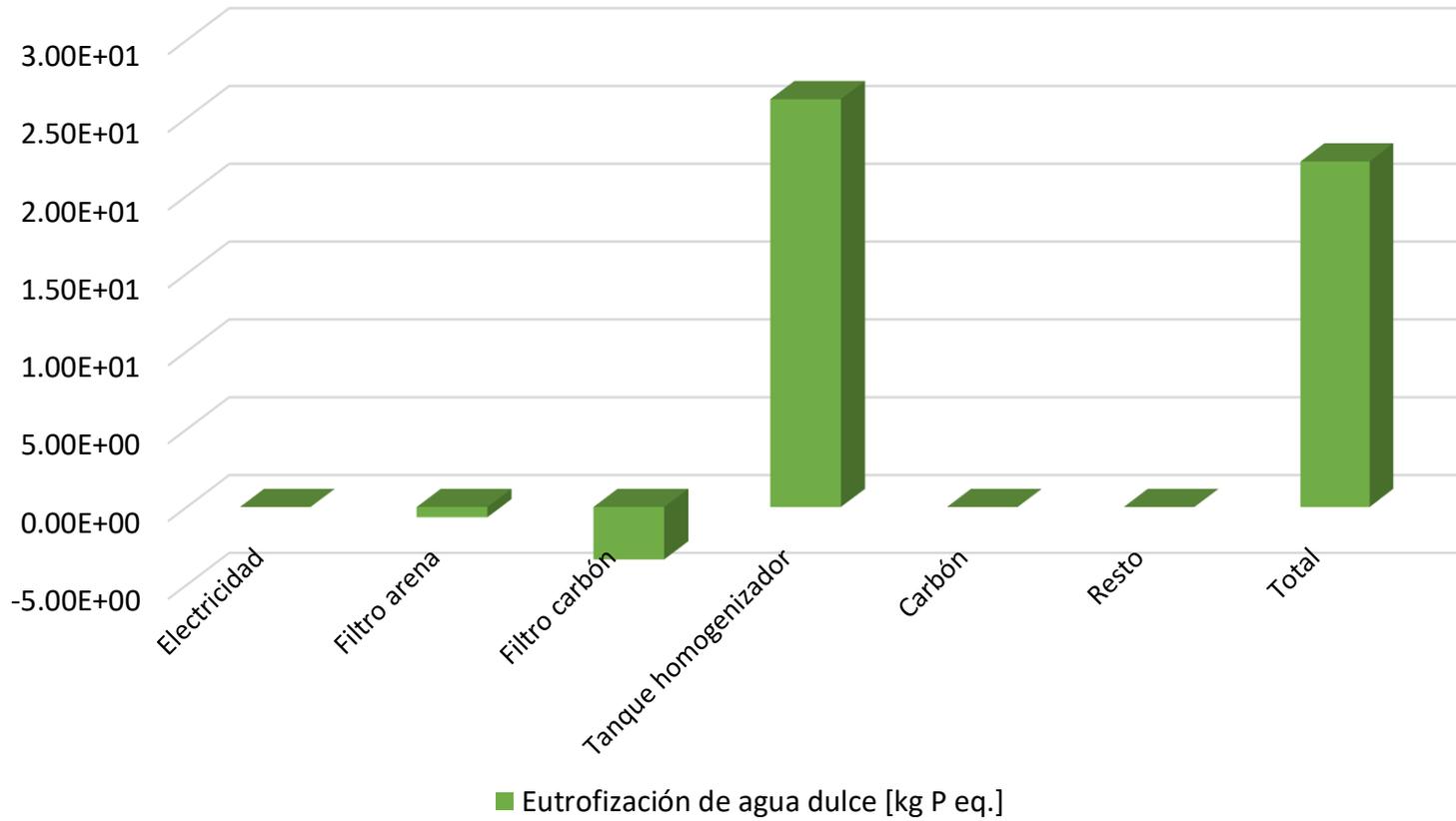
IMPACTOS TOTALES EN EL SISTEMA CONVENCIONAL Y EL SISTEMA DE OXIDACIÓN AVANZADA



Fuente: Los autores.

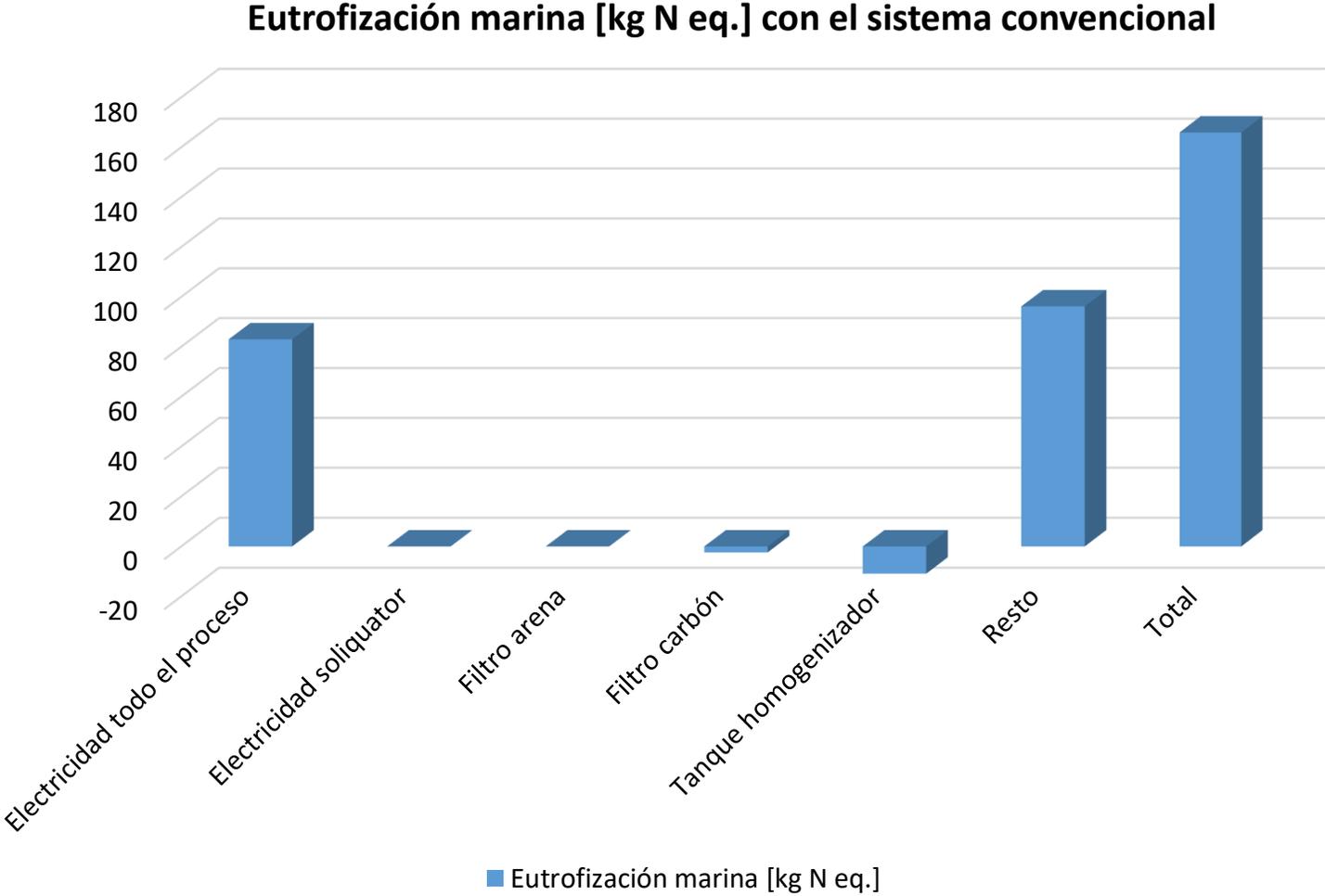
Gráfica 35. Impacto en la categoría de eutrofización de agua dulce con el sistema convencional de tratamiento.

Eutrofización de agua dulce [kg P eq.] con el sistema convencional



Fuente: Los autores.

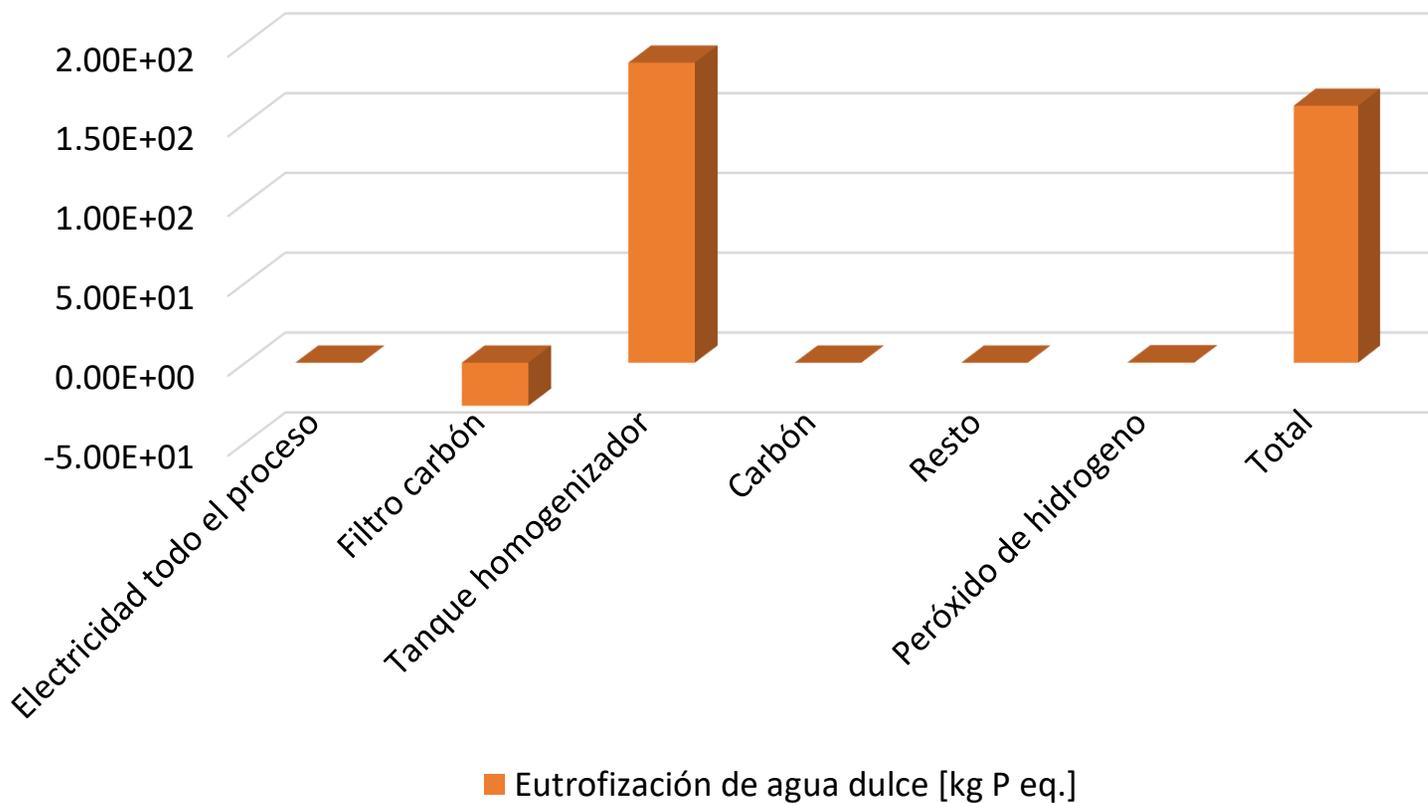
Gráfica 36. Impacto en la categoría de eutrofización marina con el sistema convencional de tratamiento.



Fuente: Los autores.

Gráfica 37. Impacto en la categoría de eutrofización de agua dulce con el Proceso de Oxidación Avanzada.

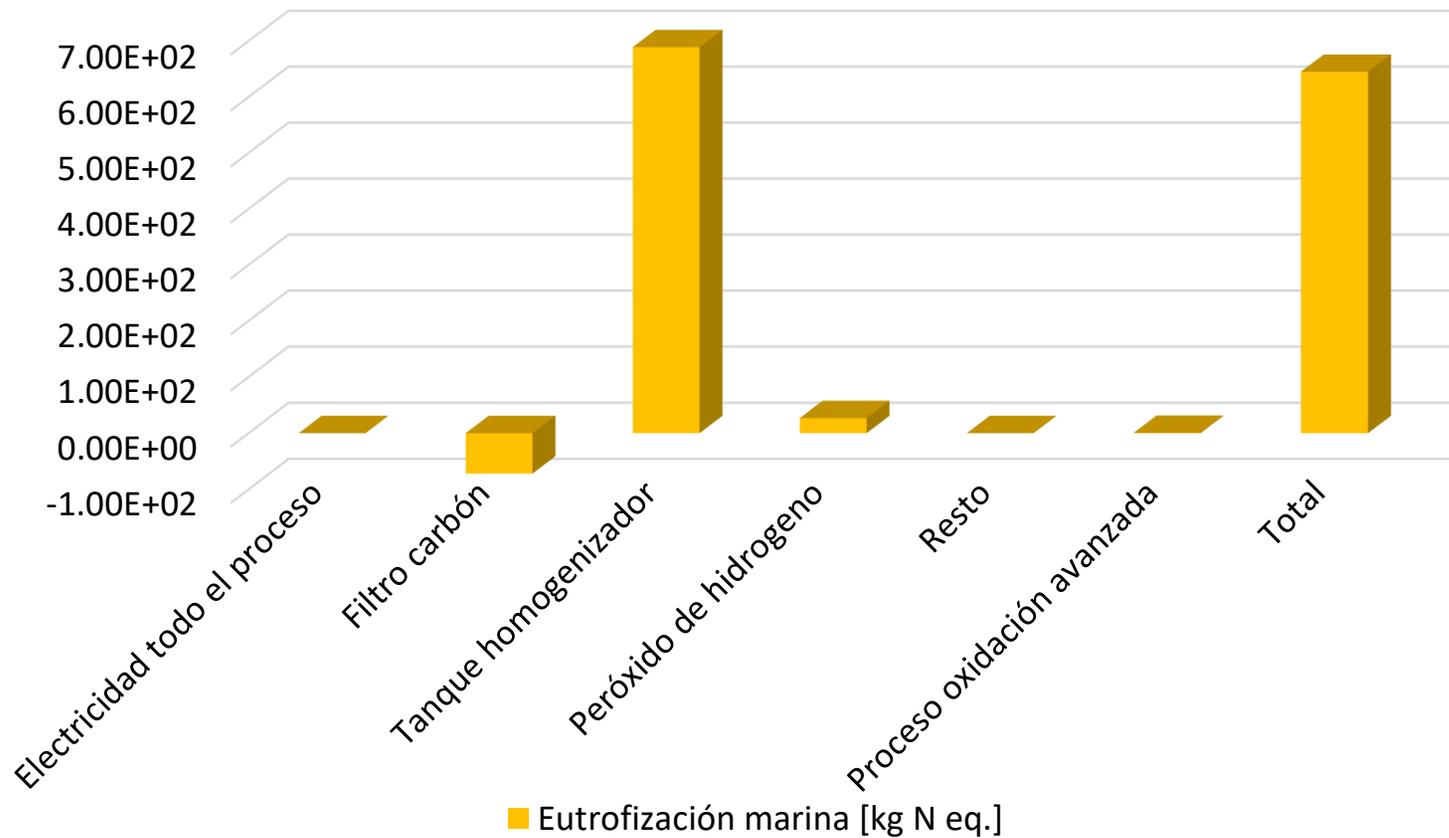
Eutrofización de agua dulce [kg P eq.] con el Proceso de Oxidación Avanzada



Fuente: Los autores.

Gráfica 38. Impacto en la categoría de eutrofización marina con el Proceso de Oxidación Avanzada.

Eutrofización marina [kg N eq.] con el Proceso de Oxidación Avanzada



Fuente: Los autores.

Como resultado se tienen los impactos o efectos potenciales sobre la salud humana, los recursos naturales, el cambio climático, debido a las cargas identificadas en las categorías de impacto durante el ciclo de vida del sistema tanto convencional como el de oxidación avanzada, en el que se realizó el reemplazo del proceso de filtro de arena por el de Proceso de Oxidación Avanzada. Donde se logra asociar cada entrada (consumo materia prima y energía) y salida (residuos y emisiones) para proceder a la evaluación de los impactos medioambientales asociados.

Se logra evidenciar en las gráficas que los impactos son causales en gran parte de la energía que se consume con el proceso de oxidación avanzada. En la *Gráfica 33. Resultados de los impactos totales del sistema convencional y el sistema con el POA.*, se presentan los totales de impactos generados por los dos sistemas y se comparan sus resultados, donde los picos más altos son por la radiación ionizada, toxicidad de agua dulce y la escasez de agua, los cuales son impactos clave en el sistema de tratamiento de agua residual en la industria textil. No obstante, se visualiza una gran diferencia de ambos sistemas, donde genera mayor impacto la propuesta con el proceso de Oxidación avanzada, ya sea por los diferentes elementos que se adicionan en el sistema, que en este caso se puede decir que su resultado se debe al análisis propio del flujo del peróxido de hidrógeno y la energía como se ve en la *Figura 41. Esquema - Planta de tratamiento con el POA.*, arrojando elevados valores y así mismo volviendo débil el proceso ante los efectos causados en la huella ecológica evaluada.

Para la representación del diagrama de barras de la *Gráfica 34. Impactos totales en los sistemas evaluados, en porcentajes.*, se evidencia un gran porcentaje por parte de los portadores de energía de usos de recursos, por lo que se adicionó en el software GaBi energía hidroeléctrica, ya que es el sistema empleado en Colombia para la obtención de energía, que también es empleada en los procesos internos en la industria, ocasionando mayor efecto en el medio ambiente. Por consiguiente, para el sistema convencional, se identifica que el cambio climático es su mayor afectación, debido al uso del suelo por parte de la extracción del carbón para el filtro de carbón.

En las últimas gráficas (*Gráfica 35. Impacto en la categoría de eutrofización de agua dulce con el sistema convencional de tratamiento.*, *Gráfica 36. Impacto en la categoría de eutrofización marina con el sistema convencional de tratamiento.*, *Gráfica 37. Impacto en la categoría de eutrofización de agua dulce con el Proceso de Oxidación Avanzada.*, *Gráfica 38. Impacto en la categoría de eutrofización marina con el Proceso de Oxidación Avanzada.*), se identifican los impactos por

parte de los procesos internos de cada sistema, donde el vertimiento y afectación al cuerpo de agua se ven reflejados con más detalle. Estos resultados son diferentes con respecto al resto de categorías de impacto evaluadas por el software. Pero que por ende se entiende que, aunque se tenga impacto positivo al agua (valores negativos), priman evidentemente el impacto negativo de eutrofización en agua dulce y marina.

En consecuencia, los resultados arrojados por el proceso de Oxidación Avanzada generan mayores impactos, por ende, se proponen diferentes alternativas que mitigan dicho impacto en el medio ambiente como lo son:

- Dióxido de titanio, por su capacidad de dispersar la luz y su resistencia a los rayos ultravioleta (Titanium Dioxide Manufactures association TDMA). Así mismo, al utilizar la radiación solar como fuente primaria de energía, le otorga un importante y significativo valor medioambiental; el proceso constituye un claro ejemplo de tecnología sostenible y como fotocatalizador, el dióxido de titanio se puede añadir a diferentes productos para descomponer los contaminantes medioambientales (Blanco J., Malato S., Estrada C., Bandala E., Gelover S. 2015).
- Investigadores de la Universidad de Córdoba (UCO) y la Academia China de las Ciencias han conseguido caracterizar para su uso en la catálisis uno de estos compuestos: los óxidos de hierro, que son más baratos que los materiales empleados actualmente y más sostenibles desde el punto de vista ambiental. Según estudios el óxido de hierro como catalizador es versátil y, debido a su capacidad magnética, es válido para separar materiales utilizando un simple imán, sin requerir una fuente de energía externa, que lo convierte en material eficiente. (Sinc 2015)
- Los radicales basados en sulfatos; son materiales con metales de transición que pueden ser nanomateriales de carbono o nanocompuestos. Los POA basados en radicales de aniones sulfato han recibido una gran atención en los últimos tiempos por su gran reactividad con los contaminantes orgánicos y su alta selectividad. Posee grandes ventajas en cuanto a la facilidad de uso, el ahorro de energía y la recuperación del catalizador. (Hoyo Torre 2018)

11. CONCLUSIONES

- El programa GPS-X 7.0.1., permite realizar un análisis de sensibilidad para lograr entender lo que pasa con cada uno de los componentes fisicoquímicos y biológicos por cada proceso implementado en el programa, es decir que permite tener un acercamiento con las condiciones de operación de cada estructura para lograr entender su funcionalidad y así mismo poder tener una implementación adecuada de cada variable que influye y el contaminante generado, ya que para cada actividad económica varía.
- Debido a que la empresa textil no suministró los valores de entrada de la caracterización del agua, al emplearse la segunda hipótesis con el programa GPS-X 7.0.1., permite realizar un proceso iterativo y simular cada proceso de la planta de tratamiento lo más similar posible, el cual deja ingresar valores iniciales de cada variable, realizando un análisis de sensibilidad detallado, permitiendo ajustar y obtener la concentración de la entrada lo más cercana al compararse con los valores de salida suministrados por la empresa.
- Con el análisis de balance de masa, se logra asociar la ley de conservación de masa la cual permite revisar las diferentes reacciones y afectaciones que se genera a un cuerpo receptor, mediante un análisis de las entradas y salidas de cada parámetro que establece la calidad del agua, comparado con la resolución 0631, que establece los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales.
- Al contar con una modelación de la calidad del agua en el programa GaBi, este permite evaluar la afectación de descarga respecto al cuerpo receptor; mediante un análisis de inventario de las categorías de impacto, para cuantificar los flujos de energía y materiales que entran y salen de una actividad durante su ciclo de vida.
- A pesar que la empresa textil maneje una economía circular, y una parte se retorna para uso en actividades de la misma empresa con el agua tratada, también tienen vertimiento a un cuerpo receptor; por lo que se considera un sistema abierto, haciendo posible el desarrollo del análisis del agua vertida de la industria textil mediante la simulación por GaBi.
- Los valores negativos en las gráficas de eutrofización en agua dulce y marina se identifican como impactos positivos al ambiente, de forma que, procesos

como el filtro de carbón, tanque homogeneizador y el filtro de arena, impactan de forma positiva, con un porcentaje bajo pero evidenciado.

- El estudio de tratamiento de agua residual es muy amplio e infortunadamente las normas reducen parámetros fundamentales que no se hacen al detalle, evitando emplear métodos que impacten menos en el medio ambiente, tomando a priori el consumismo y el manejo de negocios y no las investigaciones que se hacen, para implementarlas y mejorar.
- La investigación se limitó a los pocos datos en cuanto a procesos e información que se lograron obtener en cuanto a esta nueva tecnología de tratamiento terciario con ZnO en una planta de tratamiento de agua residual, y en cuanto la simulación por el programa GPS-X 7.0.1. que tiene bastante limitantes en cuanto al proceso de oxidación avanzada, ya que solo solicita valores de remoción, pese a esto, se logra evidenciar en los resultados de descarga del POA y el convencional que no difieren los valores de remoción, sin embargo, si el programa GPS-X 7.0.1. contemplara otros valores específicos esta remoción podría ser mucho mayor. Igualmente, se puede considerar que esta investigación y adicionando prácticas o ensayos de laboratorios más actuales, pueden obtenerse buenas bases para resaltar y dar a conocer la tecnología de tratamiento de aguas residuales en industrias textiles con procesos de oxidación avanzada, que al ser un proceso reciente, no se cuenta con resultados contundentes, pero que considerando las prácticas de laboratorios se podrían obtener mejores resultados en cuanto al Proceso de Oxidación Avanzada propuesto en conjunto con la propuesta teórica planteada.

12. REFERENCIAS

- ¿Que es un varistor? » Blog de TDTprofesional. , [sin fecha].
- AGP BOMBA, 2015. Catalogo AGP 2015. , no. 9, pp. 1689-1699. ISSN 1098-6596.
- AGUAS, T. De y CHARLA, R., 2010. Etapas del Tratamiento de Aguas Servidas Etapas del Tratamiento de Aguas Servidas. [en línea], no. 2, pp. 3-5. Disponible en: <https://tratamientodeaguasresiduales.net/etapas-del-tratamiento-de-aguas-residuales/#more-17%0Ahttps://tratamientodeaguasresiduales.net/etapas-del-tratamiento-de-aguas-residuales/>.
- AHMADI, M., SAMARBAF, S., GOLSHAN, M., JORFI, S. y RAMAVANDI, B., 2018. Data on photo-catalytic degradation of 4- chlorophenol from aqueous solution using UV/ZnO/persulfate. *Data in Brief*, vol. 20, pp. 582-586. ISSN 23523409. DOI 10.1016/j.dib.2018.08.076.
- AHUMADA-LAZO, R., 2014. Crecimiento Y Caracterización De Películas De Óxido De Zinc Por “ Sputtering ” Para Su Potencial Aplicación En Fotocatálisis. , pp. 137.
- ALFONSO MORENO, F.L., CHOACHÍ, M.Z., MENDOZA URREA, S. y PULIDO TALERO, W.E., 2015. Propuesta de diseño para un sistema de tratamiento y reutilización de efluentes textiles combinando tecnologías convencionales con el proceso de oxidación avanzada (O3/H2O2/UV). *Inventum*, vol. 10, no. 18, pp. 54-62. ISSN 1909-2520. DOI 10.26620/uniminuto.inventum.10.18.2015.54-62.
- ALONSO, M.L.F., ANTONIO, G.A.J., HUMBERTO, S.T. y CARLOS, D.D., 2018. Experimental estimation of structures impact pressure of a granular debris flow. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, vol. 34, no. 1, pp. 157-161. ISSN 01884999. DOI 10.20937/RICA.2018.34.01.14.
- ALVARADO DÍAZ, E.G., 2013. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DE UN ADITIVO POLIMÉRICO CON NANOPARTÍCULAS DE ZnO. , pp. 31109.
- Análisis y Gestión Ambiental. [en línea], 2013. Disponible en: [https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250504/2013/1.4.Análisis de ciclo de vida.pdf](https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250504/2013/1.4.Análisis%20de%20ciclo%20de%20vida.pdf).
- ARNÁIZ, C. y LSAC Y JUMAN LEBRATO, L., 2000. Tratamiento biológico de aguas residuales (Revista Tecnología del Agua, Marzo de 2000) 1. Eliminación de carbono orgánico. . S.I.:
- ARORA, S., 2014. Textile Dyes: It's Impact on Environment and its Treatment. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, vol. 05, no. 03, pp. 1-2. DOI 10.4172/2155-6199.1000e146.
- AVILA BAREÑO, I.R. y MORENO FIGUEROA, M.A., 2016. DISEÑO, PROPUESTA E IMPLEMENTACIÓN DE UN FILTRO PARA TRATAMIENTO DE AGUAS DE USO DOMÉSTICO EN TANQUES DE RESERVA EN LA POBLACIÓN DEL CASCO URBANO DE LA INSPECCIÓN DE SAN ANTONIO DE ANAPOIMA. , vol. 147, pp. 11-40.
- BARNDÖK, H., CORTIJO, L., HERMOSILLA, D., NEGRO, C. y BLANCO, Á., 2014.

- Removal of 1,4-dioxane from industrial wastewaters : Routes of decomposition under different operational conditions to determine the ozone oxidation capacity. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 280, pp. 340-347. ISSN 0304-3894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2014.07.077.
- BETHI, B., SONAWANE, S.H., BHANVASE, B.A. y GUMFEKAR, S.P., 2016. Nanomaterials-based advanced oxidation processes for wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 109, pp. 178-189. ISSN 02552701. DOI 10.1016/j.cep.2016.08.016.
- BILIŃSKA, L., GMUREK, M. y LEDAKOWICZ, S., 2016. Comparison between industrial and simulated textile wastewater treatment by AOPs – Biodegradability, toxicity and cost assessment. *Chemical Engineering Journal*, vol. 306, pp. 550-559. ISSN 13858947. DOI 10.1016/j.cej.2016.07.100.
- BLANCO GÁLVEZ, J., MALATO RODRÍGUEZ, S., ESTRADA GASCA, C.A., BANDALA, E.R., GELOVER, S. y LEAL, T., [sin fecha]. 3 PURIFICACIÓN DE AGUAS POR FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA: ESTADO DEL ARTE. . S.I.:
- BLANCO J., MALATO S., ESTRADA C., BANDALA E., GELOVER S., L.T., 2015. Purificación de Aguas por Fotocatálisis Heterogénea: Estado del Arte. *Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea*, pp. 39.
- BOJACA, R. del P., 2005. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. . S.I.:
- BOKAVA, I., 2017. Día Mundial del Agua 2017 | Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. .
- BOLIVAR, W.M., 2018a. INGENIERÍA DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS. *Pontificia Universidad Javeriana*, no. 1, pp. 43. ISSN 1098-6596. DOI 10.1017/CBO9781107415324.004.
- BOLIVAR, W.M., 2018b. INGENIERÍA DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS. *Pontificia Universidad Javeriana* [en línea], no. 1, pp. 43. [Consulta: 26 marzo 2020]. ISSN 1098-6596. DOI 10.1017/CBO9781107415324.004. Disponible en: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/186602/PPAU0156-D.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttp://journal.stainkudus.ac.id/index.php/equilibrium/article/view/1268/1127%0Ahttp://www.scielo.br/pdf/rae/v45n1/v45n1a08%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j>.
- CANSAYA QUISPE, E.S. y NABENTA AGUILAR, E.A., 2018. *Investigación para la evaluación de parámetros en agua subterránea y su potabilización para el abastecimiento en la localidad de Samuel Pastor Provincia de Camaná*. S.I.: UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA.
- CARRION, M., 2020. ¿Cuánta agua hay en el planeta? *EL ÁGORA DIARIO*.
- CENTRO EUROPEO DE POSTGRADO y UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS, 2014. El agua. Sus características y propiedades. .
- CORTAZAR MARTÍNEZ, A., CORONEL OLIVARES, C., ESCALANTE LOZADA, A.

- y GONZÁLEZ RAMÍREZ, C., [sin fecha]. Contaminación generada por colorantes de la industria textil. .
- CORTÉS, M. alonso, 2015. Principales softwares para calcular el análisis de ciclo de vida. [en línea]. [Consulta: 5 septiembre 2020]. Disponible en: <https://revistadigital.inesem.es/gestion-integrada/el-analisis-de-ciclo-de-vida-y-sus-principales-softwares-como-herramientas-de-calculo/>.
- CUESTA B., H., 2019. PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACION APLICADOS AL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA PETROQUIMICA: FENTON Y FOTO-FENTON. [en línea]. Bogotá D.C: [Consulta: 4 julio 2020]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/jspui/bitstream/10596/28100/3/%09hcuetab.pdf>.
- D. TORIKAI, B. BARAZANI, E. ONO, M. F. M. SANTOS, C.K.S., 2011. 55° Congresso Brasileiro de Cerâmica, 29 de maio a 01 de junho de 2011, Por to de Galinhas, PE, Brasil. *Anais do 55° Congresso Brasileiro de Cerâmica*, vol. d, no. 2, pp. 1695-1707.
- DE FALCO, F., COCCA, M., AVELLA, M. y THOMPSON, R.C., 2020. Microfibre release to water, via laundering, and to air, via everyday use: a comparison between polyester clothing with differing textile parameters. *Environmental science & technology*, ISSN 1520-5851. DOI 10.1021/acs.est.9b06892.
- DE SALUD, S., DE, R. y DIRECCIÓN, L.A., 2015. Determinacion De Color Aparente En Aguas. ,
- DE VERA, B., 2018. ¿Por qué la industria textil es la más contaminante después del sector petrolero? | ELESPECTADOR.COM. 8 Agosto.
- DEIANA, A., GRANADOS, D. y SARDELLA, F., 2018. Balance De Masa. *Introducción a La Ingeniería* [en línea], pp. 1-26. [Consulta: 17 octubre 2020]. ISSN 0718-3402. Disponible en: <http://www.fi.unsj.edu.ar/asignaturas/introing/BalanceDeMasa.pdf>.
- Deshidratación y secado de lodos.*, 2017. S.l.: s.n.
- DOMÈNECH, X., JARDIM, W.F. y LITTER, M.I., 2001. Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. *Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea*, no. August 2016, pp. 3-26.
- EADAOEMS, 2011. El denim. [en línea]. [Consulta: 13 septiembre 2020]. Disponible en: <http://historiadelasedaester.blogspot.com/>.
- ECOCENTURY, 2016. Gestión de residuos industriales: Causas y consecuencias de los contaminantes del agua | El Blog de EcoCentury. [en línea]. [Consulta: 22 julio 2020]. Disponible en: <http://www.ecocentury.pe/blog/gestion-residuos-industriales-causas-consecuencias-contaminantes-agua/>.
- ECOFLUIDOS INGENIEROS S.A., [sin fecha]. ESTUDIO DE LA CALIDAD DE FUENTES UTILIZADAS PARA CONSUMO HUMANO Y PLAN DE MITIGACIÓN POR CONTAMINACIÓN POR USO DOMÉSTICO Y AGROQUÍMICOS EN APURIMAC Y CUSCO. . S.I.:
- EFXTO, 2018. ¿Qué es Análisis de Sensibilidad y cómo usarlo correctamente? [en línea]. [Consulta: 30 octubre 2020]. Disponible en: <https://efxto.com/diccionario/analisis-de-sensibilidad>.

- EL TIEMPO, 2014. Colombia, en materia de ecológico - Archivo Digital de Noticias de Colombia y el Mundo desde 1.990 - eltiempo.com. .
- EMASA, 2020. Parámetros indicadores de la calidad del agua. ,
- EPA, 1996. Best Management Practices for Pollution Prevention in the Textile Industry. ,
- FAKHARI, S., JAMZAD, M. y KABIRI FARD, H., 2019. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles: a comparison. *Green Chemistry Letters and Reviews*, vol. 12, no. 1, pp. 19-24. ISSN 17517192. DOI 10.1080/17518253.2018.1547925.
- FARIAS, B., 2016. Conocimientos básicos sobre Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (Módulo I). [en línea]. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/bettys-farias-marquez/conocimientos-basicos-plantas-tratamiento-aguas-residuales-ptar-modulo-i>.
- FONT, A.N., 2020. ¿ En qué consiste la técnica ? *Acciona* [en línea], pp. 1-4. [Consulta: 13 septiembre 2020]. Disponible en: <https://www.sostenibilidad.com/desarrollo-sostenible/en-que-consiste-la-economia-circular/>.
- GARCÍA, N., VILLANUEVA, P., CAMPOS, E. y VELÁZQUEZ, A., 2012. Análisis de la adsorción como método de pulimiento en el tratamiento de aguas residuales. , vol. 14, no. 1, pp. 109-129. ISSN 1405-8626.
- GILPAVAS, E., ARBELÁEZ CASTAÑO, P.E., MEDINA ARROYAVE, J.D. y GÓMEZ ATEHORTUA, C.M., 2018. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL MEDIANTE COAGULACIÓN QUÍMICA ACOPLADA A PROCESOS FENTON INTENSIFICADOS CON ULTRASONIDO DE BAJA FRECUENCIA. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, vol. 34, no. 1, pp. 157-161. ISSN 01884999. DOI 10.20937/RICA.2018.34.01.14.
- HAO, O.J., KIM, H. y CHIANG, P.C., 2000. *Decolorization of wastewater*. 2000. S.I.: CRC Press LLC.
- HAYA LEIVA, E., 2016. Análisis de Ciclo de Vida Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental. , pp. 43.
- HERNÁNDEZ, A.M., 2007. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES EN AGUA SECADOS A 103 – 105 °C. . . S.I.:
- HOYO TORRE, L., 2018. ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN UNIVERSIDAD DE CANTABRIA Trabajo Fin de Grado ANÁLISIS DE VIABILIDAD SOCIO-ECONÓMICA DE UN PARQUE EÓLICO OFFSHORE EN CANTABRIA. . S.I.:
- INVESTIGACIÓN, C. De y ALVARADO DIAZ, E.G., 2013. *ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DE UN ADITIVO POLIMÉRICO CON NANOPARTÍCULAS DE ZnO TESIS*. S.I.: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Estado de Chihuahua Mexico.
- ISM INSTITUTO SUPERIOR DEL MEDIO AMBIENTE, 2020. Noticias de actualidad - ISM -. [en línea]. [Consulta: 5 septiembre 2020]. Disponible en: <https://www.ismedioambiente.com/programas-formativos/gabi-herramienta-de-acv/>.
- JOSÉ BLANCO JURADO, 2009. Degradación de un efluente textil real mediante procesos Fenton y Foto-Fenton. , pp. 152.

- KHAN, S.H. y PATHAK, B., 2020a. ZnO based Photocatalytic Degradation of Persistent Pesticides: A Comprehensive Review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, pp. 100290. ISSN 2215-1532. DOI 10.1016/j.enmm.2020.100290.
- KHAN, S.H. y PATHAK, B., 2020b. ZnO based Photocatalytic Degradation of Persistent Pesticides: A Comprehensive Review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, pp. 100290. ISSN 2215-1532. DOI 10.1016/j.enmm.2020.100290.
- LEDAKOWICZ, S., SOLECKA, M. y ZYLLA, R., 2001. Biodegradation, decolourisation and detoxification of textile wastewater enhanced by advanced oxidation processes. *Journal of Biotechnology*, vol. 89, no. 2-3, pp. 175-184. ISSN 01681656. DOI 10.1016/S0168-1656(01)00296-6.
- LENNTECH BV, 2016. Información de la luz Ultravioleta. .
- LOPATO, L. y VILLEGAS, M.P., 2007. *Purificación De Agua* [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: [http://www.pisademexico.com/purificadoras de agua, plantas purificadoras de agua.html](http://www.pisademexico.com/purificadoras_de_agua_plantas_purificadoras_de_agua.html).
- Los residuos que más contaminan el agua | Fundación Aquae. [en línea], 2018. [Consulta: 17 febrero 2020]. Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/consejos-del-agua/los-residuos-que-mas-contaminan-el-agua/>.
- M'ARIMI, M.M., MECHA, C.A., KIPROP, A.K. y RAMKAT, R., 2020. Recent trends in applications of advanced oxidation processes (AOPs) in bioenergy production: Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 121, pp. 109669. ISSN 18790690. DOI 10.1016/j.rser.2019.109669.
- MAZILLE, F. y SPUHLER, D., [sin fecha]. Coagulación, floculación y separación | SSWM - Find tools for sustainable sanitation and water management! .
- MENDOZA LÓPEZ, G., 2009. Decoloración de un efluente de la industria textil mediante el proceso Foto-Fenton acoplado a un sistema de biofiltración. ,
- MERCK, [sin fecha]. Reactive Black 5 Dye content ≥50 % | Remazol Black B | Sigma-Aldrich. .
- MESTRES, R., 2013. Química Sostenible: Naturaleza, fines y ámbito. *Educacion Quimica*, vol. 24, no. SPL.ISSUE1, pp. 103-112. ISSN 0187893X. DOI 10.1016/s0187-893x(13)72503-5.
- MIKLOS, D.B., REMY, C., JEKEL, M., LINDEN, K.G., DREWES, J.E. y HÜBNER, U., 2018. Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – A critical review. *Water Research*, vol. 139, pp. 118-131. ISSN 18792448. DOI 10.1016/j.watres.2018.03.042.
- MINISTERIO DE VIVIENDA, C. y T.C., 2017. *RAS 0330 - 2017*. 2017. S.l.: s.n.
- MORENO, H. y ROMERO, J., 2019. Anteproyecto Nanoarcillas potabilización 3.0 - Documentos de Google. .
- MYCSA MULDER, 2017. Cribas: qué son y cuáles son sus funciones principales. [en línea]. [Consulta: 13 octubre 2020]. Disponible en: <https://www.mycsamulder.es/cribas-que-son-funciones-principales/>.
- NÚÑEZ BAUTISTA, S.S. y VICTORIA RUEDA, T.J., 2019. TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA TEXTIL UTILIZANDO

- NANOPARTÍCULAS MAGNETICAS/BIOMASA RESIDUAL COMO TRATAMIENTO TERCIARIO. , DOI .1037//0033-2909.I26.1.78.
- OCASIO, F., 2008. Evaluacion De La Calidad Del Agua Y Posibles Fuentes De Contaminacion En Un Segmento Del Rio Piedras. , pp. 241.
- OMRI, K., NAJEH, I., DHAHRI, R., EL GHOUL, J. y EL MIR, L., 2014. Effects of temperature on the optical and electrical properties of ZnO nanoparticles synthesized by sol-gel method. *Microelectronic Engineering*, vol. 128, pp. 53-58. ISSN 01679317. DOI 10.1016/j.mee.2014.05.029.
- ONU, N., 2019. El costo ambiental de estar a la moda. *12 abril*.
- ORJUELA ORJUELA, L.C., 2013. Hoja metodológica del indicador Demanda Bioquímica de Oxígeno en las masas de agua por estación (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. . . S.l.:
- PEREDNIS, D., WILHELM, O., PRATSINIS, S.E. y GAUCKLER, L.J., 2005. Morphology and deposition of thin yttria-stabilized zirconia films using spray pyrolysis. *Thin Solid Films*, vol. 474, no. 1-2, pp. 84-95. ISSN 00406090. DOI 10.1016/j.tsf.2004.08.014.
- PÉREZ PORTO, J. y MERINO, M., 2013. Definición de recursos tecnológicos - Qué es, Significado y Concepto. *Definicion.de*.
- PEY CLEMENTE, J., 2010. *Aplicación de procesos de oxidación avanzada para tratamiento y reutilización de efluentes textiles* [en línea]. S.l.: s.n. [Consulta: 5 julio 2020]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/2241/tesisUPV2816.pdf?sequence=1>.
- PRADILLO, B., [sin fecha]. Parámetros de control del agua potable | iAgua. .
- QASIM, S.R. y ZHU, G., 2017. *Wastewater treatment and reuse: Theory and design examples: Volume 1: Principles and basic treatment*. S.l.: s.n. ISBN 9781351402026.
- QUIMINET, 2011. Métodos de deshidratación de lodos. .
- RAMBABU, K., BHARATH, G., BANAT, F. y SHOW, P.L., 2021. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Phoenix dactylifera waste as bioreductant for effective dye degradation and antibacterial performance in wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 402, no. April 2020, pp. 123560. ISSN 18733336. DOI 10.1016/j.jhazmat.2020.123560.
- RIFFO RIVAS, J.P., 2017. *Análisis de ciclo de vida de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en Lima*. S.l.: Universidad de Chile.
- RODRÍGUEZ CISNEROS, J., 2005. SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE AGUA RESIDUAL TEXTIL MEDIANTE NANOFILTRACIÓN Y OZONACIÓN PARA REUSO EN TEÑIDO. *Society*,
- RODRÍGUEZ M., C.H., 2007. Demanda química de oxígeno por reflujos cerrados y volumetría. [en línea], vol. 5, pp. 11. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Química+de+Oxígeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>.
- ROMERO ROJAS, J.A., 2002. *Potabilización Del Agua*. 3a Edición. S.l.: s.n.
- SÁENZ, G., 2018. Industria textil: Emisiones y transferencias de contaminantes en

- el agua. .
- SÁNCHEZ, C.M., [sin fecha]. La industria textil, la segunda más contaminante del planeta. .
- SANZ, A., 2016. Nanopartículas de óxido de zinc para la mejora de dispositivos de almacenamiento de energía. , pp. 10.
- SAVI, B.M., RODRIGUES, L. y BERNARDIN, A.M., [sin fecha]. SYNTHESIS OF ZnO NANOPARTICLES BY SOL-GEL PROCESSING. *Qualicer.Org*, pp. 1-8.
- SB GLOBAL, 2019. La industria textil y el medio ambiente | Sustainable Brands Madrid Sustainable Brands Madrid. .
- SCHUARTZ PACHECO MESTRINHO, S., FERNÁNDEZ CIRELLI, A. y DI RISIO, C.D., 2005. *Propiedades del agua*. S.l.: s.n. ISBN 9974-7571-6-9.
- SIERRA RAMÍREZ, C.A., 2013. *Calidad del Agua. Evaluación y diagnóstico*. S.l.: s.n. ISBN 9788578110796.
- SILUPÚ, C., SOLÍS, R., CRUZ, G., GÓMEZ, M., SOLIS, J. y KEISKI, R., 2017. Caracterización de filtros comerciales para agua a base de carbón activado para el tratamiento de agua del río Tumbes - Perú. *Revista Colombiana de Química*, vol. 46, no. 3, pp. 37-45. ISSN 2357-3791.
- SINC, A., 2015. Catalizadores con óxidos de hierro para la industria petroquímica y energética. [en línea]. [Consulta: 14 noviembre 2020]. Disponible en: <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Catalizadores-con-oxidos-de-hierro-para-la-industria-petroquimica-y-energetica>.
- SOLIS VÁZQUEZ-MELLADO, M., EN, M., ALI, I.E. y GÓMEZ, R., 2017. *Sistema de tratamiento de aguas mediante ósmosis inversa* [en línea]. S.l.: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, FACULTAD DE INGENIERÍA. [Consulta: 5 octubre 2020]. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/15143/Informe.pdf?sequence=3>.
- Sosa Caustica: Usos y Aplicaciones - Sosa Caustica. , [sin fecha].
- TERRA ECOLOGÍA PRÁCTICA, 2005. Los filtros domésticos de carbón activo | Terra.org - Ecología práctica. .
- TITANIUM DIOXIDE MANUFACTURES ASSOCIATION TDMA, [sin fecha]. ¿Qué es el dióxido de titanio? [en línea]. [Consulta: 14 noviembre 2020]. Disponible en: <https://tdma.info/es/que-es-el-dioxido-de-titanio/>.
- TORICES, D.P., 2018. Procesos de oxidación avanzada: Avances recientes y tendencias futuras. *Universidad de Cantabria*, pp. 74.
- TORO, C.G., 2011. 2. La turbidez 2. La turbidez Monitoreo de la calidad del agua. . S.l.:
- TORRES, P., HERNÁN, C., PAOLA, C. y PATIÑO, J., 2008. WATER QUALITY INDEX IN SURFACE SOURCES USED IN WATER PRODUCTION FOR HUMAN CONSUMPTION. A CRITICAL REVIEW. . S.l.:
- UN WATER, 2017. *Aguas residuales* [en línea]. S.l.: s.n. [Consulta: 5 octubre 2020]. ISBN 9789568200329. Disponible en: <http://odis.mx/aguas-residuales.html>.
- VALENCIA, S., GUTIERREZ-CLAVIJO, J., DIAZ-JIMENEZ, D., HILARIÓN-GAITÁN, L. y CASTAÑEDA-ORJUELA, C., 2019. Pgi6 Carga De Enfermedad Diarreica Aguda Asociada a Mala Calidad Del Agua, Falta De Saneamiento E Higiene De

- Manos En Colombia, 2016. *Value in Health Regional Issues*, vol. 19, no. October, pp. S35. ISSN 22121099. DOI 10.1016/j.vhri.2019.08.193.
- WANG, F., VAN HALEM, D., LIU, G., LEKKERKERKER-TEUNISSEN, K. y VAN DER HOEK, J.P., 2017. Effect of residual H₂O₂ from advanced oxidation processes on subsequent biological water treatment: A laboratory batch study. *Chemosphere*, vol. 185, pp. 637-646. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2017.07.073.
- YADAV, A., PRASAD, V., KATHE, A.A., RAJ, S., YADAV, D., SUNDARAMOORTHY, C. y VIGNESHWARAN, N., 2006. Functional finishing in cotton fabrics using zinc oxide nanoparticles. *Bulletin of Materials Science*, vol. 29, no. 6, pp. 641-645. ISSN 02504707. DOI 10.1007/s12034-006-0017-y.
- ZOUHIER, M., TANJI, K., NAVIO, J.A., HIDALGO, M.C., JARAMILLO-PÁEZ, C. y KHERBECHE, A., 2020. Preparation of ZnFe₂O₄/ZnO composite: Effect of operational parameters for photocatalytic degradation of dyes under UV and visible illumination. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 390, no. September 2019, pp. 112305. ISSN 10106030. DOI 10.1016/j.jphotochem.2019.112305.