



**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

**Escuela de  
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

**Máster en Ingeniería de Tecnologías Mineras**



**Trabajo Fin de Máster**

**Simulación mediante GPS-X del proceso de acondicionamiento  
de aguas residuales procedentes de actividades mineras para  
su reutilización en el propio sistema**

**Autor: Jorge Álava Amezola**

**Tutor: Laura Faba Peón**

**Oviedo, julio de 2021**



Simulación mediante GPS-X del proceso de acondicionamiento de aguas residuales procedentes de actividades mineras para su reutilización en el propio sistema.

---





## ÍNDICE.

<b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. CARACTERÍSTICAS DEL GRANITO.....</b>	<b>13</b>
2.1. Extracción del granito .....	16
<b>3. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES DE MINERÍA .....</b>	<b>18</b>
3.1. Características físicas .....	20
3.1.1. Caudal .....	20
3.1.2. Temperatura.....	20
3.1.3. Olor .....	20
3.1.4. Color.....	21
3.1.5. Sólidos.....	21
3.2. Características químicas .....	23
3.2.1. Materia orgánica .....	23
3.2.2. Materia inorgánica.....	24
<b>4. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE MINERÍA .....</b>	<b>26</b>
4.1. Pretratamiento.....	26
4.1.1. Tanque de homogenización .....	26
4.1.2. Desbaste.....	27
4.1.3. Desarenadores.....	28
4.1.4. Desengrasador .....	29
4.2. Tratamiento primario .....	29
4.2.1. Sedimentación.....	30
4.2.1.1. Tanques de sedimentación.....	31



4.2.2.	Flotación por aire.....	33
4.2.3.	Procesos de coagulación-floculación.....	34
4.2.3.1.	Coagulación:.....	35
4.2.3.2.	Floculación:.....	35
4.2.4.	Filtración.....	38
4.3.	Tratamiento de lodos.....	39
4.3.1.	Espesado.....	39
4.3.2.	Deshidratado de lodos.....	39
5.	<b>BASE DE CÁLCULO.....</b>	<b>41</b>
5.1.	Caudal.....	41
5.2.	Características del agua a tratar.....	43
5.3.	Legislación.....	45
5.3.1.	Normativa europea.....	45
5.3.2.	Normativa estatal.....	46
5.4.	Ensayo coagulación - floculación.....	49
5.4.1.	Elección del coagulante.....	51
5.4.2.	Elección del floculante.....	54
6.	<b>TRATAMIENTO SELECCIONADO.....</b>	<b>60</b>
6.1.	Diagrama de flujo.....	58
6.2.	Dimensionamiento de los equipos.....	59
6.2.1.	Desarenador.....	59
6.2.2.	Tanque de coagulación.....	60
6.2.3.	Tanque de floculación.....	62
6.2.4.	Tanque de sedimentación.....	63



<b>7. DISEÑO DEL PROCESO CON GPS-X.....</b>	<b>65</b>
7.1. Acerca del software .....	65
7.2. Esquema inicial GPS-X .....	66
7.3. Modificación esquema inicial.....	68
7.4. Introducción de datos.....	72
7.5. Obtención de datos .....	81
7.5.1. Datos entrada agua.....	81
7.5.2. Datos sedimentador: .....	83
7.5.3. Datos salida lodos:.....	88
7.5.4. Datos salida agua limpia .....	89
7.5.5. Diagramas de SANKEY:.....	92
7.6. Optimización del esquema .....	96
7.7. Estudio de sensibilidad .....	108
7.7.1. Variación del caudal.....	108
7.7.2. Variación de la demanda química de oxígeno (DQO).....	110
7.7.3. Variación de la concentración de coagulante .....	112
7.7.4. Variación de la temperatura .....	113
7.7.5. Variación del pH .....	114
7.8. Esquema final GPS-X.....	115
7.8.1. Diagrama final GPS-X .....	122
<b>8. BALANCE ECONOMICO.....</b>	<b>123</b>
<b>9. CONCLUSIONES.....</b>	<b>128</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>130</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS.

Ilustración 1. Diagrama composición del granito.....	13
Ilustración 2. Cantera de granito tipo.....	17
Ilustración 3. Parámetros del agua residual minera (Fernandez, 2013).....	18
Ilustración 5. Esquema de diferentes tipos de sólidos presentes en aguas residuales .....	22
Ilustración 6. Esquema de un tanque de homogenización.....	27
Ilustración 7. Esquema desarenador.....	28
Ilustración 8. Diferentes tanques de sedimentación rectangular.....	32
Ilustración 9. Tanque de sedimentación circular .....	32
Ilustración 10. Esquema del circuito de agua a tratar .....	42
Ilustración 11. Valores máximos admisibles para la reutilización del agua residual. (R.D.1620/2007).....	47
Ilustración 12. Ensayo laboratorio: pesaje del granito en la báscula.....	50
Ilustración 13. Ensayo laboratorio: Aspecto de la mezcla realizada de agua y granito.....	50
Ilustración 14. Ensayo laboratorio: Coagulantes utilizados en el ensayo. De izquierda a derecha: sulfato de hierro, sulfato de aluminio y cloruro de hierro.....	51
Ilustración 15. Aspecto de las tres muestras de suspensión de granito tras 3 minutos de mezclado con el coagulante. De izquierda a derecha: sulfato de hierro, sulfato de aluminio y cloruro de hierro.....	52
Ilustración 16. Aspecto de las tres muestras de suspensión de granito tras 5 minutos de mezclado con el coagulante. De izquierda a derecha: sulfato de hierro, sulfato de aluminio y cloruro de hierro.....	53
Ilustración 17. Presencia de los vasos de precipitado y elección del coagulante, C1 ( $Cl_3Fe_6H_2O$ ).....	53
Ilustración 18. Ensayo de laboratorio: Adición de floculante en las mezclas realizadas. De izquierda a derecha: catiónico, neutro y aniónico. ....	55
Ilustración 19. Ensayo laboratorio: JAR-test, momento en el que se añade los floculantes .....	55
Ilustración 20. Aspecto de las tres muestras de suspensión de granito tras 4 minutos de mezclado con el floculante. De izquierda a derecha: catiónico, neutro y aniónico. ....	56
Ilustración 21. Apariencia final de las tres muestras de suspensión de granito tras 10 minutos de mezclado con el floculante.....	57



Ilustración 22. Ensayo laboratorio: Resultado final de la muestra con la adición de coagulante y floculante.....	58
Ilustración 23. Aspecto que presenta el interior vaso precipitación, se aprecian sólidos en suspensión. ....	59
Ilustración 24. Sección modelo que tiene tanque de sedimentación.....	64
Ilustración 25. Pantalla principal que se observa al abrir el programa GPS-X.....	65
Ilustración 26. Esquema inicial creado en el programa GPS-X.....	66
Ilustración 27. Diferentes equipos seleccionados, GPS-X .....	67
Ilustración 28. Pantalla de simulación del programa GPS-X.....	69
Ilustración 29. Modificación del esquema inicial creado en el GPS-X.....	71
Ilustración 30. GPS-X. Dato introducido como flujo de entrada en el sistema .....	72
Ilustración 31. GPS-X, Pantalla "Influent characterization" .....	73
Ilustración 32. GPS-X. Dato introducido como DQO del agua residual .....	73
Ilustración 33. GPS-X. Datos introducidos de temperatura y pH .....	74
Ilustración 34. GPS-X. Dato: producción de arena por flujo en el desarenador.....	75
Ilustración 35. GPS-X. Dato introducido de coagulante seleccionado. ....	75
Ilustración 36. GPS-X. Dato introducido, dosis del coagulante. ....	75
Ilustración 37. GPS-X. Dato: Sedimentador. ....	78
Ilustración 38. GPS-X. Dato: Físico Sedimentador. ....	78
Ilustración 39. GPS-X. Dato: Operacional espesador. ....	79
Ilustración 41. Símbolo influente GPS-X. ....	81
Ilustración 42. Símbolo sedimentador "high-rate" GPS-X. ....	83
Ilustración 43. DQO en función de las capas del sedimentador.....	85
Ilustración 44. SST en función de las capas del sedimentador.....	87
Ilustración 45. Símbolo salida lodos GPS-X.....	88
Ilustración 46. Símbolo salida agua limpia GPS-X.....	90
Ilustración 47. Diagrama Sankey flujo. ....	92
Ilustración 48. Diagrama Sankey DQO. ....	93
Ilustración 49. Diagrama Sankey SST.....	94
Ilustración 50. Pantalla modelización (modo optimizar) .....	97
Ilustración 51. GPS-X, pantalla del Modo optimizar. ....	97
Ilustración 52. Dato introducido en el GPS-X, pantalla del Modo optimizar. ....	98
Ilustración 53. Optimización del área del sedimentador en función de los SST.....	99



Ilustración 54. Valores optimización de la superficie obtenidos .....	100
Ilustración 55. Dato GPS-X introducido en el Modo optimizar .....	101
Ilustración 56. Optimización del área del sedimentador en función de la DQO .....	101
Ilustración 57. Valores de la optimización obtenidos.....	102
Ilustración 58. Dato DBO5, GPS-X Modo optimizar .....	103
Ilustración 59. Optimización del área del sedimentador en función del la BBO5 final .....	103
Ilustración 60. Valores optimización. ....	104
Ilustración 61. SST en función de las capas del sedimentador.....	105
Ilustración 62. DQO en función de las capas del sedimentador.....	105
Ilustración 63. Estudio sensibilidad, flujo.....	108
Ilustración 64. Gráfico obtenido en el estudio sensibilidad realizado con el cambio del flujo de entrada .....	109
Ilustración 65. Estudio sensibilidad, DQO. ....	110
Ilustración 66. Gráfico obtenido en el estudio sensibilidad realizado con el cambio de la DQO .....	111
Ilustración 67. Estudio sensibilidad, dosificación química. ....	112
Ilustración 68. Estudio sensibilidad realizado de la temperatura.....	113
Ilustración 69. Estudio sensibilidad realizado del pH .....	114
Ilustración 70. GPS-X, símbolo del equipo de proceso de oxidación avanzada .....	117
Ilustración 71. Datos introducidos en el equipo de proceso de oxidación avanzada .....	117
Ilustración 72. Resultados de la primera simulación añadiendo el proceso de oxidación avanzada .....	118
Ilustración 73. Datos finales del proceso de oxidación avanzada .....	118
Ilustración 74. Resultados obtenidos en la simulación final .....	119
Ilustración 75. Diagrama Sankey flujo final. ....	120
Ilustración 76. Diagrama Sankey DQO final.....	121
Ilustración 77. Diagrama Sankey SST final. ....	121
Ilustración 78. Diagrama final de la planta de tratamiento de aguas residuales en el GPS-X. ....	122
Ilustración 79. GPS-X, pantalla de simulación en la que aparece el botón de los costes de operación.....	124
Ilustración 80. GPS-X, diagrama Sankey de los costes de operación de la planta de tratamiento.....	125



Ilustración 81. Porcentajes de los costes de operación en función de cada tipo de trabajo  
..... 126



## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Propiedades físicas del granito (Maresch & Medenbach, 1990).....	14
Tabla 2. Velocidad y tiempo de sedimentación para diversas partículas (Hernandez Muñoz, 1992) .....	37
Tabla 4. Parámetros del agua a tratar (Luis, 2021).....	43
Tabla 5. Parámetros máximos del agua para su reutilización (R.D. 1620/2007) .....	48
Tabla 6. Ensayo laboratorio: Coagulantes utilizados en el ensayo .....	51
Tabla 7. Ensayo laboratorio: Floculantes elegidos para el ensayo .....	54
Tabla 8. Parámetros que posee el agua residual en la entrada al sistema.....	60
Tabla 9. Objetivos de salida del agua residual en la planta .....	60
Tabla 10. Resumen de dimensiones del equipo de desarenado .....	60
Tabla 11. Resumen de dimensiones del tanque de coagulación .....	61
Tabla 12. Resumen de dimensiones del tanque de floculación .....	62
Tabla 13. Resumen de dimensiones del equipo de sedimentación .....	64
Tabla 14. Datos que posee en la salida el agua residual (esquema inicial).....	69
Tabla 15. Datos de entrada del influente al GPS-X.....	82
Tabla 16. Datos entrada y salida sedimentador GPS-X.....	84
Tabla 17. Datos salida lodos GPS-X. ....	88
Tabla 18. Datos salida agua limpia GPS-X. ....	90
Tabla 19. Comparativa de resultados entre la salida de agua, con la planta optimizada y sin optimizar. ....	106
Tabla 20. Resultados finales del sistema de tratamiento de aguas residuales.....	119
Tabla 21. Datos introducidos del coste operativo de cada equipo de la planta de tratamiento .....	123
Tabla 22. Resumen de los costes de operación producidos en la planta .....	126



## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

Este documento contiene el trabajo de fin de Máster denominado “Simulación mediante GPS-X del proceso de acondicionamiento de aguas residuales procedentes de actividades mineras para su reutilización en sistemas de riego”.

Con el siguiente proyecto se pretende diseñar el acondicionamiento de las aguas procedentes de una cantera de granito, situada en el norte de España. La mayoría de los datos utilizados, son datos aproximados, ya que las empresas no proporcionan esos datos.

El objetivo del trabajo es diseñar una estación de depuración de las aguas contaminadas mediante el programa informático GPS-X y posteriormente estudiar la viabilidad, tanto económica como técnica, de dicho proceso.

El fin de este trabajo se basa en la depuración de aguas residuales y su posterior reutilización en el sistema de tratamiento de granito y se tendrán en cuenta los impactos medioambientales, económicos y sociales que se pueden generar.

En las labores mineras de minas y canteras, se utiliza el agua como agente para la extracción, transporte y separación del mineral deseado, generando agua contaminada con sólidos en suspensión y metales pesados.

Las labores de explotación y extracción del granito originan, moderados caudales de aguas residuales que se deberán tratar. Sin embargo, los mayores caudales producidos no tienen lugar en dichas labores sino en las operaciones posteriores, el tratamiento o lavado del mineral, cuyo objetivo es la obtención de un producto apto para su comercialización y conseguir un granito más puro. En este caso para su utilización en cemento, se utiliza una gran cantidad de agua para separarlo de los estériles que lo acompañan.

El objetivo principal de este proyecto es ofrecer una visión clara del proceso de depuración más adecuado, de forma que permita cumplir con los parámetros de reutilización establecidos en la legislación vigente.



La razón principal de la elección de dicho trabajo es la de intentar plasmar sobre él, los conocimientos adquiridos, en la asignatura de gestión y tratamiento de residuos y efluentes.

El presente proyecto, ha sido dirigido por la profesora de la Universidad de Oviedo, Laura Faba Peón, y ha sido en su totalidad realizado por el alumno, Jorge Álava Amezola.

Al no haberse podido realizar una toma de muestras de agua reales, será un trabajo lo más cercano a la realidad posible, pero en algunos casos, los datos utilizados serán datos aportados por una empresa minera, datos basados en la bibliografía, estudios anteriores, proyectos similares, etc.



## 2. CARACTERÍSTICAS DEL GRANITO

Los granitos son rocas masivas de grano pequeño y medio-grande. Pertenecen a la clasificación de rocas ígneas plutónicas. Macroscópicamente son blancos, gris claro, rosados, amarillentos y a veces verdosos. Se compone de cuarzo (20-60%), feldespato alcalino, y también puede aparecer, moscovita, horblenda, más raramente augita, además de granate, andalucita, silimanita, y cordierita (Maresch & Medenbach, 1990)

Es una roca continental, que resulta de un proceso de pausada solidificación del magma rico en sílice, también llamado magma saturado. Este se da a gran profundidad de la corteza terrestre y en condiciones de alta presión.

Suele ser de aspecto granular y textura gruesa. Sus tonos son muy diversos: gris, beige, negro, blanco, marrón, rojo claro... el granito tiene una relación entre los feldespatos alcalinos y los plagioclasas. (UPM, Explotaciones de Roca Ornamental, 2007)

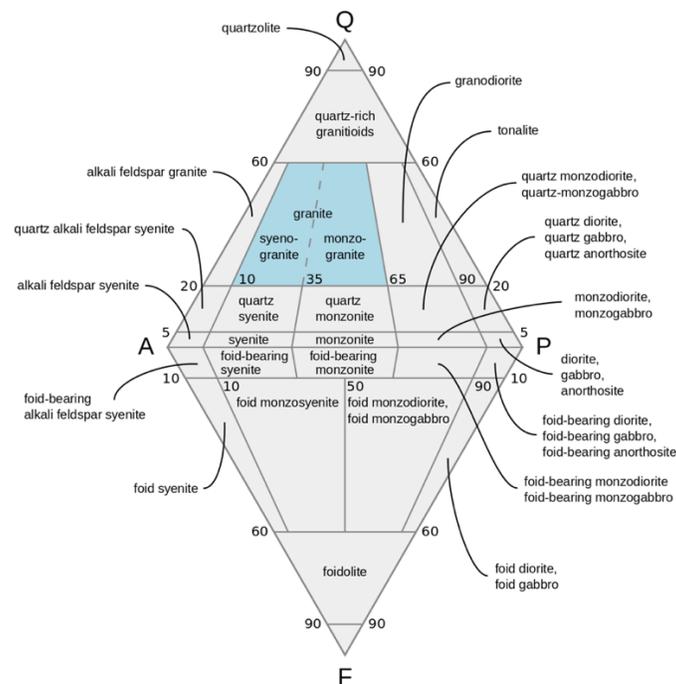


Ilustración 1. Diagrama composición del granito



### Propiedades físicas:

GRANITO		
Propiedad	Valor	Unidades
Dureza	7	Escala Mohs
Peso específico	2800	$Kg/m^3$
Color	Gris	-----
Porosidad	0,15-1,5	%
RCS	97-310	Mpa
Resistencia mecánica a flexión	145	$Kg/cm^2$
Resistencia al desgaste	0,42	mm
Resistencia al choque	54	cm

*Tabla 1. Propiedades físicas del granito (Maresch & Medenbach, 1990)*

### Usos:

- Construcción
  - Revestimientos de fachadas
  - Suelos, solerías, pavimentos
  - Columnas
  - Escaleras
  - Bordillos
  - Cimentación
  
- Escultura
  
- Mobiliario urbano
  - Bancos
  - Mesas
  - Fuentes



- Obra civil
  - Escolleras
  - Embalses
  
- Áridos
  - Gravas decorativas para jardinería
  - Balasto para el ferrocarril
  - **Áridos para hormigones**

En este caso, el fin al que se destina este granito extraído en una cantera de Galicia será el de árido para la fabricación de hormigones, para darles mayor consistencia.



## 2.1. Extracción del granito

Los lugares de extracción del granito son las canteras, explotaciones mineras a cielo abierto especializadas en la extracción de rocas industriales como el granito.

El proceso de extracción se puede realizar por dos vías. La primera, la perforación y voladura controlada de bloques grandes de piedra de granito. La segunda, mediante el uso de equipos de corte con hilo diamantado. En el caso de este trabajo es una cantera situada en Galicia, y la cual explota el granito para su utilización en hormigones, mediante el primer método mencionado, perforación y voladura.

Las condiciones geológicas de Galicia permiten la proliferación de decenas de canteras de granito a lo largo de la región. Las canteras de granito gallegas llevan a cabo cada año exportaciones valoradas en más de 90 millones de euros, es decir, más del 75% del total español (Minería sostenible Galicia, 2019). Esta cantera será del tipo, canteras en foso con rampas de acceso. Su origen viene de la necesidad de introducir maquinaria móvil en las canteras en foso y la imposibilidad de utilizar grúas para ello, por lo que se optó por la construcción de rampas mediante el empleo de bloques defectuosos y materiales estériles debidamente compactados, para poder conectar entre sí los diferentes niveles de extracción, conservándose las pendientes adecuadas para la circulación de los vehículos de transporte. (Minería sostenible Galicia, 2019)

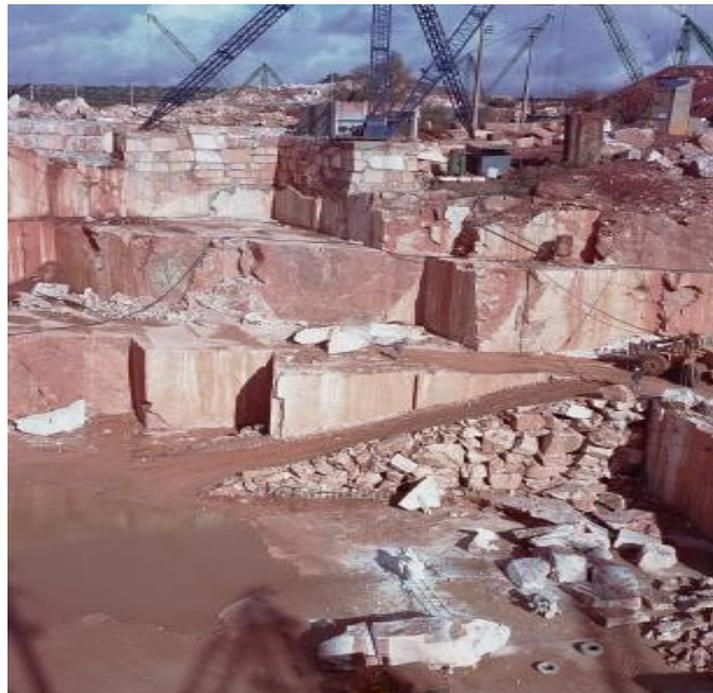
Siendo la anterior mencionada la disposición más frecuente para las canteras en foso españolas, además de estar muy extendida en otros países productores de roca ornamental, ya que permite el aprovechamiento de la versatilidad de los equipos de carga sobre neumáticos para manipulación de bloques y de los camiones para el transporte de materiales y equipos. (Cabaleiro, 2021)

El principal problema que afrontar es el drenaje de la explotación y la evacuación de las aguas de infiltración y pluviales, con el fin de mantener la continuidad de las operaciones en condiciones secas e intentar que las aguas contaminen lo menos posible.



Como, tanto para la explotación como para su posterior tratamiento del granito, se utiliza una gran cantidad de agua que deberá ser tratada, para no contaminar ningún río ni cauce cercano, el objetivo fundamental de este trabajo será diseñar y experimentar que proceso será el más favorable para que esas aguas puedan ser reutilizadas en el propio sistema.

Para ello se deben conocer los parámetros iniciales del agua a tratar y los parámetros finales que están reglados por las leyes de aguas.



*Ilustración 2. Cantera de granito tipo.*



### 3. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES DE MINERÍA

El conocimiento de la naturaleza y propiedades de las aguas residuales procedentes de la actividad minera es esencial para el posterior diseño de las instalaciones de recogida, tratamiento y evacuación y para la gestión de la calidad del medio ambiente. En la siguiente tabla se muestran parámetros característicos del agua residual minera y su procedencia.

CARACTERÍSTICAS		PROCEDENCIA	
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>	Color	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aguas residuales domésticas e industriales.</li> <li>• Desintegración natural de materiales orgánicos.</li> </ul>	
	Olor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aguas residuales en descomposición.</li> <li>• Vertidos industriales.</li> </ul>	
	Sólidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua de suministro.</li> <li>• Aguas residuales domésticas e industriales.</li> <li>• Erosión del suelo.</li> <li>• Infiltración.</li> <li>• Conexiones incontroladas.</li> </ul>	
	Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aguas residuales domésticas e industriales.</li> </ul>	
<b>CONSTITUYENTES QUÍMICOS</b>	Orgánicos	Carbohidratos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aguas residuales domésticas e industriales</li> </ul>
		Grasas animales, aceites y grasas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aguas residuales domésticas, comerciales e industriales.</li> </ul>
		Pesticidas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Residuos agrícolas.</li> </ul>
		Proteínas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aguas residuales domésticas y comerciales.</li> </ul>
		Fenoles	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vertidos industriales</li> </ul>
		Agentes termo activos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aguas residuales domésticas e industriales.</li> </ul>
		Otros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desintegración natural de materiales orgánicos.</li> </ul>

*Ilustración 3. Parámetros del agua residual minera (Fernandez, 2013)*



<b>CONSTITUYENTES QUIMICOS</b>	Inorgánicos	Alcalinidad	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aguas residuales domésticas.</li><li>• Aguas de suministro</li><li>• Infiltración del agua subterránea.</li></ul>
		Cloruros	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aguas residuales domésticas.</li><li>• Agua de suministro</li><li>• Infiltración del agua subterránea</li><li>• Ablandadores de agua</li></ul>
		Metales pesados	<ul style="list-style-type: none"><li>• Vertidos industriales.</li></ul>
		Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aguas residuales domésticas.</li><li>• Residuos agrícolas.</li></ul>
		pH	<ul style="list-style-type: none"><li>• Vertidos industriales.</li></ul>
		Fósforo	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aguas residuales domésticas e industriales.</li><li>• Escorrentía residual.</li></ul>
		Azufre	<ul style="list-style-type: none"><li>• Agua de suministro.</li><li>• Aguas residuales domésticas e industriales.</li></ul>
		Compuestos tóxicos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Vertidos industriales.</li></ul>

(Continuación)

*Ilustración 4. Parámetros del agua residual minera (Fernandez, 2013)*

A continuación, se dará una explicación más extensa de los parámetros más importantes del agua procedente de las actividades mineras, con especial atención a las aguas producidas en las actividades extractivas de granito.



### **3.1. Características físicas**

#### **3.1.1. Caudal**

El caudal es la cantidad de fluido que circula a través de las tuberías por unidad de tiempo. Las unidades en las que se mide el caudal son  $m^3/h$ .

Uno de los parámetros fundamentales a la hora de diseñar una planta de tratamiento es la cantidad de vertido por unidad de tiempo que va a llegar a la instalación. El caudal en este caso estará relacionado con el agua procedente de la planta de tratamiento del granito. El diseño se realizará para estudiar el agua que sale de dicha planta y de ahí se obtendrán los parámetros.

En todo momento se deberá tener en cuenta el caudal de entrada a tratar, las pérdidas que se ocasionaran en dicho proceso, y el caudal a recircular.

#### **3.1.2. Temperatura**

El agua residual que se utilizará presenta una temperatura bastante uniforme. Aunque habrá pequeñas diferencias que se deben a la estación del año en la que nos encontremos.

Por supuesto, cuanto mayor sea la distancia que el agua residual debe recorrer hasta la planta de tratamiento, más se parecerá la temperatura de entrada a la temperatura ambiente.

#### **3.1.3. Olor**

Los malos olores son debidos a los gases producidos por la descomposición de la materia orgánica. En este caso será un agua que en principio no deberá tener problemas de olor, ya que las partículas suspendidas serán de granito y no se tiene materia orgánica.



### 3.1.4. Color

El color del agua residual será gris, con sólidos en suspensión o flotantes fácilmente reconocibles.

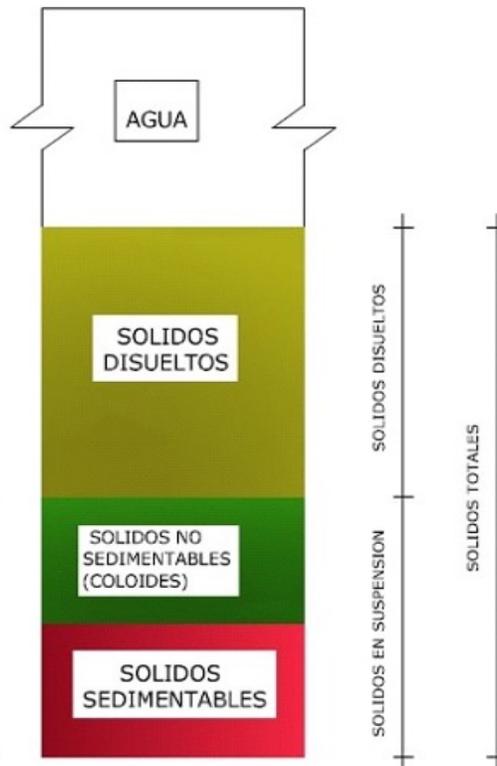
### 3.1.5. Sólidos

Uno de los objetivos fundamentales de las depuradoras es la eliminación de los sólidos contenidos por el agua residual. Estos sólidos son de varios tipos:

- **Sólidos totales:** esta medida da la cantidad total de sólidos presentes, independientemente de su naturaleza y de la forma en la que se encuentren en el agua. En este caso la gran mayoría de sólidos serán de granito. Si se toma una muestra del agua residual, se evapora toda el agua y se pesa el residuo seco resultante, obtendremos los sólidos totales contenidos en el agua de partida.
- **Sólidos disueltos:** son aquellos que atraviesan los filtros cuando se toma una muestra de agua residual y se hace pasar a través de un filtro inferior a 100  $\mu\text{m}$ .
- **Sólidos en suspensión:** son los sólidos que se quedan retenidos por el filtro de tamaño de poro igual o inferior a 2 $\mu\text{m}$ .
- **Sólidos sedimentables:** es la fracción de sólidos en suspensión capaz de separarse del agua residual por sedimentación. Estos sólidos se ven de manera óptima en la práctica realizada en el laboratorio.
- **Sólidos no sedimentables:** es el resto de los sólidos en suspensión, que no se separan por sedimentación. La diferencia entre el comportamiento de los sólidos sedimentables y los no sedimentables se debe al tamaño, forma y peso de las partículas sólidas. Estos sólidos se deberán sedimentar mediante la ayuda de floculantes o coagulantes.



En la siguiente imagen se observan los tipos sólidos que existen en las aguas residuales procedentes de una cantera.



*Ilustración 4. Esquema de diferentes tipos de sólidos presentes en aguas residuales*



## 3.2. Características químicas

### 3.2.1. Materia orgánica

Dentro de la materia orgánica se puede distinguir entre distintos tipos de compuestos, más o menos complejos (proteínas, carbohidratos, grasas, aceites y moléculas orgánicas sintéticas como son: agentes tensoactivos, fenoles y pesticidas), y cuya degradación biológica requiere un tiempo más o menos largo. Sin embargo, desde el punto de vista de la depuración se suele evitar el estudio pormenorizado de los componentes de la materia orgánica, y se utiliza en lugar de este unas medidas que dan una idea acerca del oxígeno necesario para su estabilización. Las medidas más extendidas de materia orgánica son la demanda biológica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO), que definiremos a continuación:

- **Demanda biológica de oxígeno a los cinco días (DBO<sub>5</sub>):** esta medida representa la cantidad de oxígeno necesaria para estabilizar biológicamente la materia orgánica contenida en una muestra de agua, incubada durante cinco días. Con esta medida se pretende reproducir el consumo de oxígeno en un medio natural, como podría ser un río, ocasionado por el vertido de agua residual. La temperatura del ensayo es de 20 °C, y su duración corresponde a una estabilización del 60-70 % de la materia orgánica.
- **Demanda química de oxígeno (DQO):** con esta medida se estima el oxígeno necesario para oxidar químicamente la materia orgánica contenida en el agua. Puesto que por medios químicos la oxidación de la materia orgánica es más completa, el valor de la DQO es mayor que el de la DBO<sub>5</sub>. Es posible establecer relaciones entre DBO<sub>5</sub> y DQO para distintos tipos de aguas residuales, por lo que a veces se sustituye una medida por la otra.



### 3.2.2. Materia inorgánica

- **Oxígeno disuelto:** el oxígeno disuelto es crucial para la buena marcha de una planta de tratamiento de agua residual. La estabilización de la materia orgánica requiere un aporte de oxígeno disuelto. Cuando el consumo excede al aporte de oxígeno, el agua está en condiciones anaeróbicas y se pueden producir problemas de olores, el proceso de depuración transcurre más lentamente, y en definitiva, la depuradora deja de funcionar correctamente.
- **pH:** El agua pura es la asociación química de hidrógeno y oxígeno. que se unen en una proporción de dos a uno para formar la molécula de agua, H<sub>2</sub>O. Una de las características de esta molécula es su capacidad para disociarse, es decir, separarse en dos partes con cargas eléctricas de distinto signo:



El pH es una medida de la concentración de iones hidrógeno en el agua. Para agua pura, el pH vale siete (7). Los valores de pH inferiores a siete indican que el agua tiene carácter ácido, y los superiores que el agua tiene carácter básico.

- **Nutrientes:** Se llama así las especies químicas utilizadas como alimento en el desarrollo de los microorganismos. Aunque los nutrientes abarcan un gran número de especies que los microorganismos necesitan en poca cantidad. Los nutrientes principales son nitrógeno, fósforo y azufre. En el agua a analizar serán inexistentes lo que es una gran ventaja debido a que se evita el crecimiento rápido de las algas.
- **Cloruros:** Los cloruros proceden de la descarga de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales, y también, en las regiones costeras, de la intrusión del agua salada. Al igual que los nutrientes no serán objeto de estudio en nuestro trabajo.



- **Alcalinidad:** Debida a la presencia de hidroxilos, carbonatos y bicarbonatos. La alcalinidad de una solución es su capacidad para neutralizar ácidos. Al aumentarse la alcalinidad, el pH es menos sensible de ser modificado y al disminuirse será más sensible de ser modificado. Por lo tanto, se deberán mantener los valores de la alcalinidad entre 80 y 120 ppm. Se controla la alcalinidad para no generar un aumento incontrolado del pH, que dificulta la reutilización, y para que el agua esté lo menos turbia posible.
- **Dureza:** La dureza es la concentración de compuestos minerales que tendrá el agua a tratar, normalmente, sales de magnesio y calcio. Las aguas subterráneas que colindan con la caliza tendrán mayor dureza, en este caso al no ser aguas subterráneas deberemos observar la dureza de dicha agua residual. Se estudiará en el trabajo si es necesario un descalcificador, para tratar el agua (Santander, 2010).

La dureza es debida a las sales disueltas, puede provocar depósitos e incrustaciones. Se puede diferenciar entre, dureza total, dureza permanente o dureza temporal. Se puede dividir la dureza del agua en diferentes tipos:

  - Aguas blandas: < 50 ppm
  - Aguas ligeramente duras: 50-100 ppm
  - Aguas duras: 100-200 ppm
  - Aguas muy duras: > 200 ppm
- **Gases:** Los gases más frecuentes en el agua residual sin tratar son  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $NH_3$  y  $CH_4$ . Para ello se deberán tratar, si sus valores están fuera de los permitidos por la ley.



## 4. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE MINERÍA

### 4.1. Pretratamiento

Se considera pretratamiento al proceso que se sitúa a la cabecera de la estación depuradora a fin de eliminar residuos sólidos, materias flotantes, arenas y grasas que podrían crear problemas de funcionamiento o causar desperfectos en la planta. Se trata de adecuar el agua para posteriores tratamientos.

Las principales operaciones del pretratamiento son el desbaste, desarenado y desengrasado.

#### 4.1.1. Tanque de homogenización

La homogenización del caudal consiste en la laminación de las variaciones de caudal para lograr un caudal constante o casi constante. Se superan así los problemas operacionales causados por las variaciones del caudal mejorando la eficacia de los procesos posteriores (Metcalf & Eddy, 1995).

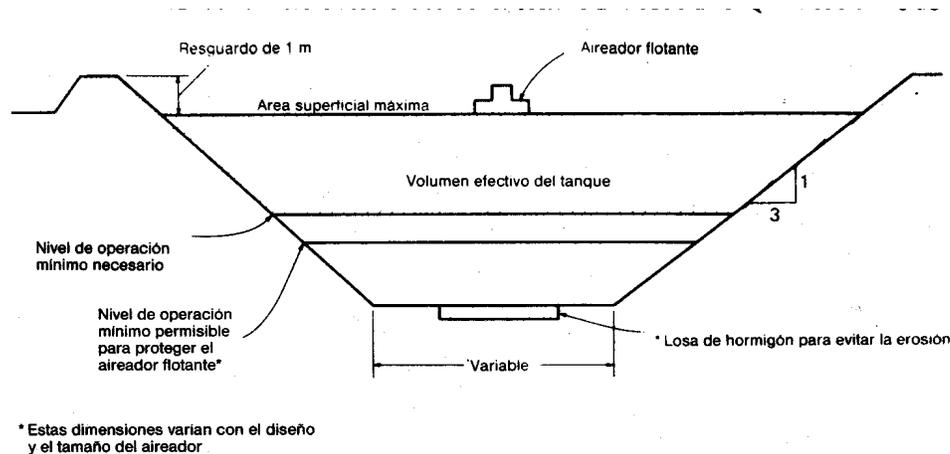
Las principales ventajas que se obtienen de la aplicación de la homogenización de caudales son las siguientes:

- Mejora del tratamiento biológico debido a la eliminación o disminución de los efectos causados por cargas bruscas a causa de la dilución de sustancias inhibitoras y estabilización del pH.
- Mejora de la calidad del efluente y del rendimiento de los tanques de sedimentación secundaria al trabajar a cargas de sólidos constantes.
- Disminución de las superficies necesarias en la filtración del efluente y así conseguir la mejora del rendimiento de los filtros.

A parte de la mejora del rendimiento de la mayoría de las operaciones y procesos de tratamiento, la homogenización del caudal es una opción atractiva para incrementar el



rendimiento de las plantas de tratamiento que se encuentran sobrecargadas dado el coste relativamente bajo que supone.



*Ilustración 5. Esquema de un tanque de homogenización*

#### 4.1.2. Desbaste

El desbaste consiste en eliminar los componentes sólidos gruesos del agua residual para proteger a la depuradora de la llegada de residuos voluminosos que podrían provocar obturaciones y atascamientos en las distintas fases de tratamiento disminuyendo así su eficacia. Los procesos empleados para el desbaste son el paso por rejillas y tamices (De Luis Alvarez, 2013).

- **Rejas:** En los procesos de tratamiento del agua residual, las rejillas se utilizan para proteger bombas, válvulas, conducciones y otros elementos contra los posibles daños y obturaciones provocados por la presencia de trapos y objetos de gran tamaño.
- **Tamices:** El tamizado consiste en la filtración sobre soporte delgado perforado, que se utiliza en numerosos campos en el tratamiento del agua residual. Los tamices son aconsejados cuando las aguas brutas transportan cantidades excepcionales de SS, flotantes o residuos, o cuando existen vertidos industriales importantes. No son



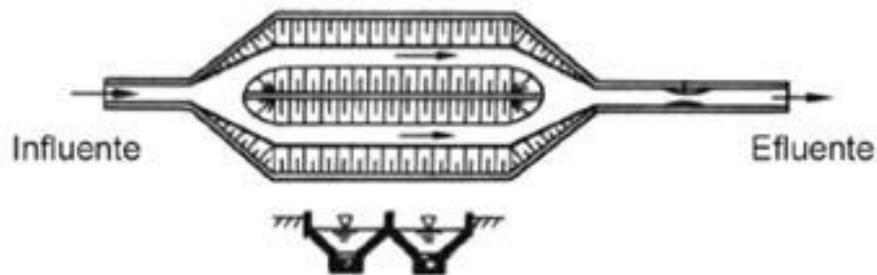
aconsejables cuando la concentración de aceites y grasas en el agua bruta es elevada.

### 4.1.3. Desarenadores

La misión de los desarenadores es separar arenas, término que engloba no solamente a las arenas propiamente dichas, sino también a las gravas, cenizas metálicas y cualquier otra materia pesada que tenga velocidad de sedimentación o peso específico superiores a los de los sólidos orgánicos, putrescibles del agua residual. En este caso es posible que esto sea una buena herramienta, para eliminar partículas de granito.

Los desarenadores deberán proteger los equipos mecánicos móviles de la abrasión y desgaste anormales, reducir la formación de depósitos pesados en las tuberías, canales y conductos, y la frecuencia de limpieza de los digestores que hay que realizar como resultado de excesivas acumulaciones de arena en dichas unidades.

Se estima más económico bombear el agua residual, con la arena incluida, hasta los desarenadores que si estuvieran ubicadas a continuación de los desarenadores.



*Ilustración 6. Esquema desarenador*

Existen dos tipos generales de desarenadores, de flujo horizontal y aireado. En el primero de ellos, el flujo atraviesa el desarenador en dirección horizontal, controlándose la velocidad rectilínea del flujo mediante la propia geometría de la instalación u uso de secciones de control provistas de vertederos especiales situados en el extremo de aguas en la parte de abajo del tanque. El aireado consiste en un tanque de aireación con flujo en



espiral, en el que la velocidad es controlada por la geometría del tanque y la cantidad de aire suministrada al mismo.

#### **4.1.4. Desengrasador**

Es un tanque separador de grasas que consiste en un depósito compuesto de tal manera que la materia flotante ascienda y permanezca en la superficie del agua residual hasta que se recoja y elimine, mientras que el líquido salga del tanque de forma continua, a través de una abertura situada en el fondo, o por debajo de unos muros o deflectores de espuma bastante profundos. Esta operación puede conseguirse en un tanque especial o combinarse con la decantación primaria, lo que dependerá del proceso y naturaleza del agua residual.

La mayoría de los separadores de grasas son rectangulares o circulares y están provistos para tiempos de retención de 1 a 15 minutos. La salida, que está sumergida, se halla situada en el lado opuesto a la entrada y a una cota inferior a ésta para facilitar la flotación y eliminar cualquier sólido que pueda sedimentarse.

## **4.2. Tratamiento primario**

Se entiende por tratamiento primario el proceso de separar por medios físicos las partículas en suspensión no retenidas en el pretratamiento. Se incluyen igualmente tratamientos que requieran la utilización de productos químicos o coagulantes para formar flóculos de gran tamaño que decanten rápidamente. Como se observará en el ensayo que se realizó en el laboratorio. (Metcalf & Eddy, 2003) (Metcalf & Eddy, 1995)

Dentro de este tipo de tratamientos encontramos la decantación o sedimentación primaria, la flotación con aire y la coagulación-floculación.



#### 4.2.1. Sedimentación

La sedimentación se define como el proceso mediante el cual las partículas, más pesadas que el fluido en el que se encuentran suspendidas, descienden y se depositan sobre el fondo debido a la acción de la gravedad.

En función de las características de los sólidos suspendidos y de su concentración, los procesos de sedimentación se dividen en cuatro tipos (Corbitt, 2003):

- **Sedimentación de clase I:** (Ej. Desarenado) Se denomina así a la sedimentación de una concentración diluida de partículas discretas en suspensión que no presentan tendencia a flocular. Este tipo de sedimentación es característica de procesos de simple decantación, como por ejemplo en los desarenadores.
- **Sedimentación de clase II:** (Ej. Decantación primaria) Corresponde a aquellas aguas residuales que contienen un amplio rango de partículas, con características diferentes de tamaño y propiedades superficiales. En ellas, las partículas más pesadas sedimentan más rápido y se juntarán a partículas más ligeras para formar agregados que aumentan de tamaño a medida que avanza el proceso. En este tipo de sedimentación, se produce una mayor eficiencia en la separación a medida que aumenta la profundidad.
- **Sedimentación de clase III:** También conocida como sedimentación por zonas, corresponde a suspensiones en las que hay una concentración de sólidos elevada. En ellas, los sólidos sedimentan como una masa única produciéndose una interfase entre estos y el agua clarificada. Los sólidos que sedimentan se distribuyen en tres zonas desde la superficie hasta el fondo: zona de sedimentación impedida, zona de transición y zona de compactación, donde las partículas se sustentan unas a otras.
- **Sedimentación de clase IV:** Tiene lugar en procesos de espesamiento o compresión de lodos, en los que las partículas están en contacto físico entre ellas. Este proceso de espesamiento es importante cuando se tratan suspensiones con alto contenido en sólidos como las correspondientes a la sedimentación de clase III.



#### **4.2.1.1. Tanques de sedimentación**

La finalidad del tratamiento por decantación es eliminar los sólidos fácilmente sedimentables y el material flotante, y por tanto, reducir el contenido de sólidos suspendidos.

Los tanques de decantación primaria pueden constituir el único medio de tratamiento del agua residual, o bien pueden utilizarse como un paso preliminar al tratamiento posterior. Cuando se utilizan como único medio de tratamiento, estos tanques sirven para la eliminación de sólidos sedimentables capaces de formar depósitos de fangos en las aguas receptoras y del aceite libre, grasas y otras materias flotantes. Si se emplea como paso previo a un tratamiento biológico, su función es reducir la carga aplicada en estas unidades. Los fangos de decantación primaria, que estén con corrección proyectados y eficazmente operados, deberán eliminar del 50 al 70 % de los sólidos suspendidos, y del 25 al 40 % de la DBO<sub>5</sub> (Metcalf & Eddy, 2003).

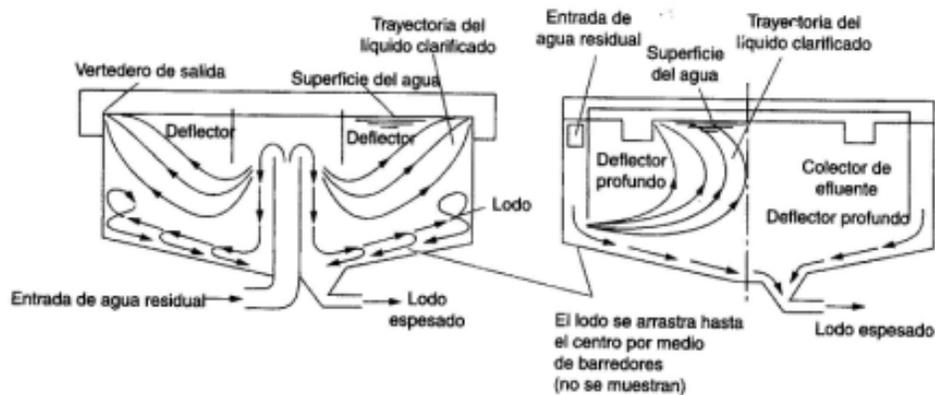
##### **Tanques rectangulares:**

Los sólidos que sedimentan son arrastrados a unos cuencos para el fango en el caso de tanques pequeños, y a unos canales de fondo transversal, en los grandes. Éstos, a su vez, están equipados con mecanismos colectores transversales, generalmente del mismo tipo que los longitudinales, que transportan los sólidos a uno o más cuencos de fango.

Los tanques rectangulares pueden asimismo efectuar la extracción del fango mediante un mecanismo tipo puente que se desplaza por encima y debajo del depósito sobre unos raíles que se apoyan en las paredes laterales. Del puente se suspenden una o más rasquetas que son abatibles para no arrastrar fango en su desplazamiento de vuelta.



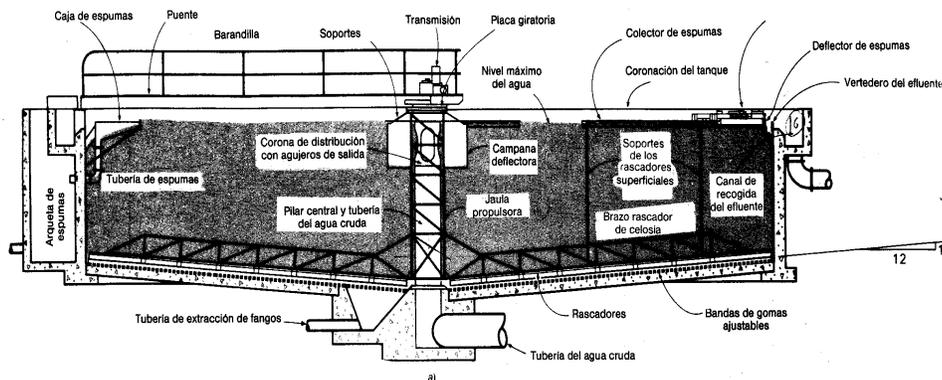
Generalmente se adoptan como solución frente a los tanques circulares cuando es preciso cerrar o cubrir los tanques con un techo y cuando, por limitaciones de espacio, es necesario construir tanques de dos pisos (Metcalf y Eddy, 1995).



*Ilustración 7. Diferentes tanques de sedimentación rectangular*

### Tanque de sedimentación circular:

En los tanques circulares el modelo de flujo es radial. Para conseguir un modelo de flujo radial, el agua residual a decantar puede introducirse en el centro o en la periferia del tanque. Ambas configuraciones han demostrado ser satisfactorias.



*Ilustración 8. Tanque de sedimentación circular*



En el diseño de alimentación central, el agua residual es conducida al centro del tanque por una tubería suspendida del puente, o embebida en hormigón por debajo de la solera. En la zona central, el agua residual pasa por una campana circular de distribución proyectada para repartir el flujo por igual en todas las direcciones. El mecanismo de rascado del fango gira lentamente y puede tener dos o cuatro puentes equipados con rascadores. Los puentes incluyen, asimismo, unos rascadores superficiales para la eliminación de espumas. También se utilizan mecanismo de extracción de fango por bombeo y succión.

En el diseño con alimentación periférica existe un deflector circular suspendido a corta distancia del muro del tanque, formando un espacio anular en el que se descarga el agua residual en dirección tangencial lo que obliga a fluir según una espiral alrededor del tanque y por debajo del deflector, recogándose el agua clarificada por medio de unos vertederos colocados a ambos lados de un canal situado en la parte central. La grasa y la espuma quedan retenidas en la superficie del espacio anular.

#### **4.2.2. Flotación por aire**

Otra alternativa de tratamiento físico para la eliminación de sólidos suspendidos es la flotación, proceso mediante el cual las partículas se separan del agua residual fijándose a burbujas de aire introducidas en el seno del líquido. Las partículas ascienden hasta la superficie y se acumulan en ella, retirándose finalmente mediante desespumadores.

La flotación por aire se utiliza cuando los procesos de sedimentación no son adecuados, ya sea por la pequeña diferencia de densidad entre las partículas sólidas a eliminar y el agua, o simplemente porque dichas partículas tienen malas características de sedimentación.

La flotación por aire ofrece ventajas considerables en determinadas situaciones. Sin embargo, supone mayores costes operativos que los procesos de sedimentación y la necesidad de disponer de personal con mayor formación. Por otro lado, se estima que los costes energéticos pueden ser del orden de 50 veces mayores en las instalaciones de flotación (BREF, 2003).



En este caso, a priori, los procesos de sedimentación serán los más adecuados, ya que están formados en su mayoría por partículas cuyo tamaño las hace susceptibles de sedimentar fácilmente por gravedad. No obstante, la flotación por aire puede considerarse como una opción para las partículas de menor tamaño que no puedan eliminarse mediante estos procesos.

#### **4.2.3. Procesos de coagulación-floculación**

Mediante este proceso se ayudará al tratamiento primario de las aguas residuales, con la adición de coagulantes y floculantes. Se ha visto anteriormente que la decantación primaria es capaz de eliminar los sólidos sedimentables y flotantes. Para aumentar el rendimiento del proceso será necesario, además, eliminar sólidos coloidales. Esto se puede hacer mediante la incorporación de los procesos de floculación y coagulación. (Urrusuno, 2017)

Los procesos de coagulación-floculación se basan en la adición de compuestos químicos con el objetivo de desestabilizar las partículas coloidales y de pequeño tamaño en suspensión, y posteriormente facilitar su agregación en partículas mayores o flóculos. Una vez formados los flóculos, estos sedimentan con una velocidad mayor que la de las partículas individuales.

Existen dos tipos de coagulantes y floculantes, inorgánicos y orgánicos. Los inorgánicos suelen estar compuestos de sales metálicas, normalmente de aluminio o hierro (sulfato de aluminio, cloruro de hierro y sulfato de hierro), mientras que los orgánicos son polímeros (polielectrolitos), que se refieren a una gran variedad de compuestos macromoleculares, solubles en agua, de origen natural o sintético, que tienen la cualidad de potenciar la floculación de las partículas en suspensión.



#### **4.2.3.1. Coagulación:**

La coagulación consiste en un proceso de desestabilización de partículas en suspensión coloidal presentes en el agua, para potenciar la etapa de decantación o espesado en la que esas partículas deben separarse del agua.

Su objetivo es conseguir mayores rendimientos que los obtenidos con los procesos anteriores, implica la eliminación de los coloides estables que forman parte de los sólidos en suspensión. Esta desestabilización de las partículas coloidales es la que se realiza a través de la coagulación. (Hernandez, 1994)

Se quiere añadir el coagulante en este sistema con el objetivo de que la coagulación sea un proceso previo a la decantación y así consiga cambiar las propiedades de los elementos insolubles, de modo que sean fácilmente separables. Con esto se tratará de aumentar el rendimiento de separación de SS y DBO<sub>5</sub>, mejorar la flotación y eliminar la turbidez.

Los coagulantes añadidos en todo momento serán electrolitos de carga opuesta a las de las partículas coloidales, con el objetivo de desestabilizarlas.

Coagulantes más utilizados:

- Alúmina
- Sulfato ferroso
- Sulfato férrico
- Cloruro férrico

#### **4.2.3.2. Flocculación:**

La flocculación es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas flocculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado. Este proceso tendrá gran importancia en el diseño del proceso de acondicionamiento de las aguas residuales que



proceden de la planta de tratamiento de granito. Como se observará en posteriores apartados, se realizó un ensayo de laboratorio con diferentes floculantes.

Realizando una floculación del agua residual previa a la decantación, se puede conseguir aumentar la velocidad ascensional de diseño y disminuir el tiempo de retención en decantación. A igualdad de condiciones, el uso de la floculación puede conseguir un aumento de 10 a 20 puntos en el rendimiento de reducción de sólidos en suspensión.

Esta floculación puede realizarse bien por aireación, fundamentalmente por difusión de aire para limitar al máximo los cortantes, o bien mecánicamente. En este último caso, suele ser normal la disposición de la floculación y la decantación en un solo aparato, ubicando el floculador en el centro del decantador circular.

La floculación mediante agitación suave del agua residual consigue la agregación de las partículas al aumentar la probabilidad de contacto entre las mismas. Otra forma de aumentar esta probabilidad es aumentar la concentración de partículas. Por ello parece lógica la incorporación del exceso de fangos activos al efluente del decantador primario. Existen datos que indican un aumento de rendimiento de la decantación primaria al flocular la mezcla agua-fangos antes de la decantación. Igualmente se han detectado fracasos al incorporar los fangos directamente al decantador.

Floculantes más utilizados:

- Sílice activada
- Polielectrolitos

En la siguiente tabla se muestra el tiempo necesario para que ciertos materiales y organismos recorran verticalmente 1 metro de agua, influenciados únicamente por su peso.



Diámetro de partículas (mm)	Orden de magnitud	Velocidad de sedimentación (mm/s)	Tiempo necesario para decantar un metro
10	Gravilla	1000	1 segundo
1	Arena gruesa	100	10 segundos
$10^{-1}$	Arena fina	8	2 minutos
$10^{-2}$	Cieno	$147 \cdot 10^{-3}$	2 horas
$10^{-3}$	Bacterias	$154 \cdot 10^{-5}$	7,5 días
$10^{-4}$	Partículas de arcilla	$154 \cdot 10^{-7}$	2 años
$10^{-5}$	Partículas coloidales	$154 \cdot 10^{-9}$	206 años

*Tabla 2. Velocidad y tiempo de sedimentación para diversas partículas (Hernandez Muñoz, 1992)*

Juntamente con los sólidos suspendidos se suele eliminar entre un 15 y un 25 % de la materia orgánica disuelta que se adhiere a las partículas y se reduce la DQO del agua si las partículas sedimentadas son materiales reductores (De Luis Alvarez, 2013).

Para garantizar un buen funcionamiento del proceso debe realizarse un control de diversos parámetros como la temperatura, pH y la velocidad de agitación, ya que influyen de forma determinante en la coagulación-floculación de las partículas.

Generalmente se realiza la adición del coagulante y floculante por etapas, en las cuales el agua residual recorre una serie de cámaras o tanques donde se mezcla con los reactivos. Finalmente, el agua se conduce al tanque de sedimentación principal. En los procesos de coagulación se emplean velocidades de agitación elevadas ya que así se mejora la mezcla de los reactivos con el agua y aumentan las colisiones entre partículas. En la etapa de floculación se emplean velocidades de agitación bajas que garanticen la formación de nuevos flóculos sin romper los que ya se han formado.



#### **4.2.4. Filtración**

El proceso de tratamiento por filtración se basa en la utilización de un medio poroso, a través del cual se hace circular el agua y en el que quedan retenidas las partículas sólidas. Se utilizan filtros de distintos tipos, tamaños de apertura y formas de rejilla en función del tamaño de los sólidos a eliminar y de la concentración de estos.

El proceso de filtración requiere un influente de baja concentración relativa en sólidos. A pesar de contar con determinadas ventajas, como ser una técnica poco compleja y que elimina algunos contaminantes disueltos, también presenta desventajas como son la producción de atascamientos, la necesidad de lavado y la posibilidad de que se produzca crecimiento bacteriano, y estas se deberán tener siempre en cuenta.

Al querer reutilizar el agua en el propio sistema, el proceso de filtración se deberá realizar, después de los procesos de coagulación y floculación.



### **4.3. Tratamiento de lodos**

El tratamiento de los lodos producido en las plantas de tratamiento de aguas residuales, durante su proceso, en las fases primaria, secundaria y terciaria, involucra una combinación de procesos físico, químico y biológico. Los lodos se producen en el pretratamiento, mediante la eliminación de las arenas y en el tratamiento primario, en el equipo de sedimentación. Los lodos que se generan hay que tratarlos mediante un proceso de espesamiento de lodos y posteriormente de deshidratación, para así aprovechar la máxima cantidad de agua posible mediante una recirculación en el sistema.

#### **4.3.1. Espesado**

La función del espesado es la de aumentar la fracción sólida de los lodos, para reducir el costo de los tratamientos posteriores, reduciendo los volúmenes a ser procesados. Además, el espesamiento sirve para incrementar la sequedad (proporción de materia seca) de los lodos sin que el lodo deje de ser un líquido. El espesamiento puede obtenerse por gravedad utilizando medios mecánicos.

#### **4.3.2. Deshidratado de lodos**

Los sistemas de deshidratación de lodos son equipos diseñados para eliminar el agua de los sólidos, concentrándolos aún más. La deshidratación puede producirse de manera natural (mediante camas secas, secado solar), durante un largo periodo de tiempo. Mas rápidamente, aunque en mas pequeñas cantidades (y también más costoso) son las máquinas de proceso como las prensas (filtros de prensa) y centrifugación.



# MEMORIA



## 5. BASE DE CÁLCULO

A la hora de comenzar a diseñar el sistema de depuración de las aguas con contenido en granito, se deben tener claros algunos datos, que posteriormente se introducirán en el GPS-X. Debido a que la empresa minera que proporciono los datos y las muestras no ha podido proporcionar más datos debido a la confidencialidad, algunos de los datos con los que trabajaremos serán adquiridos de otros estudios.

Según los datos proporcionados, sabemos que, en la zona de estudio, las partículas de granito serán muy pequeñas, ya que este granito se trata para hacer hormigón, y el granito a la salida de la planta de tratamiento será menor a 100 micras.

### 5.1. Caudal

A la hora de tratar y limpiar el granito lo máximo posible, para obtener un granito puro, la cantidad de agua que se utiliza es muy grande, por eso se realiza con un sistema cerrado. En esta configuración entra agua limpia y en vez de verter al cauce dicha agua, se reutilizará en el propio sistema.

El funcionamiento en circuito cerrado presenta como ventaja precisamente que no se vierten las aguas residuales, si no que estas son recirculadas en su totalidad. Sin embargo, estas aguas también deben de ser tratadas y depuradas, puesto que de no hacerlo pueden originar problemas en los distintos procesos de tratamiento.

La planta de tratamiento del granito realiza el tratamiento de 630 t/h de granito y para ello necesita 280 m<sup>3</sup>/h de agua. La entrada de agua en el sistema será una mezcla de agua limpia (para compensar las pérdidas que se originan) y el agua recirculada que se tratará posteriormente mediante el GPS-X (Luis, 2021).

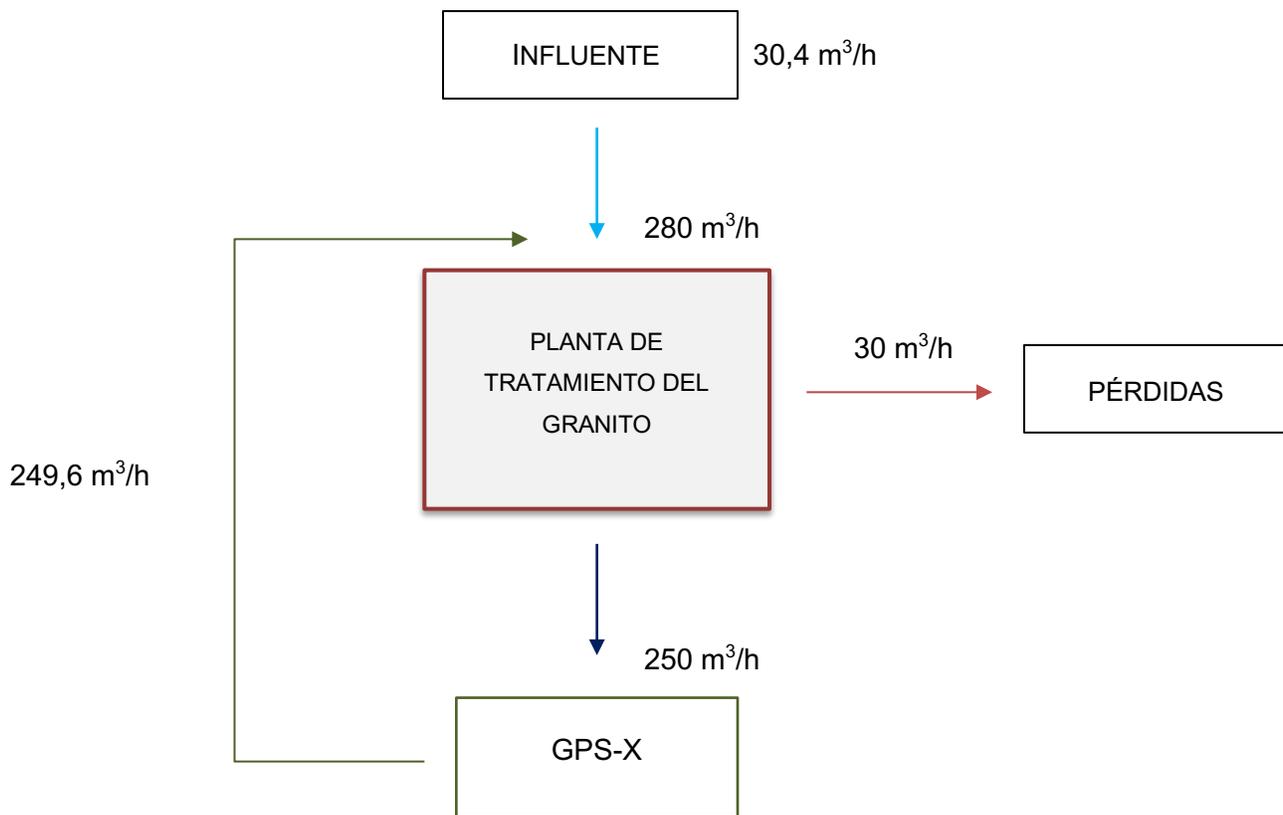
Del caudal de 280 m<sup>3</sup>/h, de la entrada, se divide en 30 m<sup>3</sup>/h de agua limpia y 250 m<sup>3</sup>/h de agua tratada y recirculada. Con esto se consigue que el gasto de agua sea lo menor posible, y por lo tanto abaratar los costes. Una vez tratada el agua, y recirculada se le



añadirán  $30,4 \text{ m}^3/\text{h}$  de agua limpia, para contrarrestar las pérdidas ocasionadas por las pérdidas de humedad. Aproximadamente, se generan un 11% de pérdidas del caudal inicial en la planta de tratamiento debido a la humedad generada e la planta de tratamiento (Luis, 2021).

A continuación, se muestra un esquema de los caudales que trabajan en la planta de tratamiento y el caudal a tratar. En dicha figura se puede observar el caudal de agua limpia incorporada, las pérdidas en el sistema y el agua tratada que posteriormente será recirculada.

**Esquema:**



*Ilustración 9. Esquema del circuito de agua a tratar*



## 5.2. Características del agua a tratar

Como se ha comentado anteriormente, es necesario realizar el tratamiento de 250 m<sup>3</sup>/h de agua residual previamente a su recirculación. Los siguientes datos, que se utilizarán para el estudio y diseño del acondicionamiento de aguas residuales, han sido proporcionados por FYM (cantera de granito), ya que fue imposible realizar una toma de muestras propia en la planta de tratamiento y poder obtener datos propios. Es importante destacar que los valores mostrados se corresponden con valores medios estadísticos.

No se pudo realizar una distribución granulométrica del granito existente en las aguas residuales. Las partículas de granito serán de tamaño pequeño, por debajo en todo momento de 100 micras, aunque es posible que existan partículas de más tamaño, por lo que se realizará un desarenado. De acuerdo con los datos ofrecidos por FYM la concentración del agua residual a tratar será del **11,98%** en peso de granito.

A continuación, se muestran los parámetros del agua residual:

PARÁMETROS	VALORES	UNIDADES
pH	7,9	-
Color	Gris	-
Dureza total	113	mg/l de CaCO <sub>3</sub>
Sólidos suspendidos	211	mg/l
DQO	180	mg O <sub>2</sub> /l
Aceites y grasas	<8,9	mg/l
Hidrocarburos totales	< 0,84	mg/l

*Tabla 3. Parámetros del agua a tratar (Luis, 2021)*

Como es posible observar, las aguas residuales que proceden de la planta de tratamiento de granito tienen una elevada carga contaminante, la cual consiste fundamentalmente en una concentración alta de sólidos en suspensión y valores anormalmente altos de demanda química de oxígeno (DQO) debido a la presencia de



minerales reductores. Son los parámetros más importantes que tratar, ya que los aceites y grasas y hidrocarburos totales están en parámetros adecuados para su vertido. (R.D.1620/2007, 2007).

Se tratan los datos hasta llegar a los límites exigidos por el Real Decreto 16620/2007, para poder reutilizar el agua tratada en el propio sistema. En todo momento se deberán cumplir con las exigencias establecidas por la legislación vigente sobre recirculación de las aguas. Para ello, será necesario lograr:

- Concentración de sólidos suspendidos totales < 35 mg/l.
- Color inapreciable en dilución 1/20.
- Concentración de materia sedimentable < 0.5 mg/l.
- Contenido en sólidos decantables nulo.
- Demanda química de oxígeno (DQO) < 150 mg O<sub>2</sub>/l.
- Demanda biológica de oxígeno: < 25 mg/l

Observando los valores límites se observa que el principal valor que se debe tratar es el de sólidos suspendidos y la demanda química de oxígeno (DQO). Este último tiene una serie de alternativas para su tratamiento y conseguir reducir el valor hasta adecuarlo al *Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.*



### 5.3. Legislación

Actualmente, para controlar cualquier tipo de daño que puedan causar los vertidos de aguas residuales en el medio ambiente, se han establecido una serie de leyes y real decretos para su gestión, con el fin de acabar con la contaminación.

La directiva 2000/60/CE define la contaminación como la introducción directa o indirecta, como consecuencia de la actividad humana, de sustancias en la atmosfera, agua o suelo, que puedan ser perjudiciales para la salud humana o los diferentes ecosistemas.

El principal objetivo que cumple la legislación es:

- Crear bases para la ordenación y regulación de la gestión del agua
- Prevenir y reducir la contaminación
- Promover su uso sostenible
- Proteger el medio ambiente
- Recuperar costes de servicios relacionados con el agua

A continuación, se presenta legislación relacionada con las aguas residuales, creadas con el fin de cumplir los diferentes objetivos:

#### 5.3.1. Normativa europea

DIRECTIVA MARCO DEL AGUA (DMA): Directiva 2000/60/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Establece las pautas de la futura política de protección de las aguas en la Unión Europea. Se imponen una serie de objetivos medioambientales a cumplir por los estados en materia de calidad de las aguas (art.4). En este sentido hace la distinción entre el estado ecológico (Anexo V) y el estado químico de las aguas. También se introducen importantes prescripciones que deberán tenerse en cuenta en materia de Planificación Hidrológica.



El objetivo de esta normativa es establecer el marco general para la protección de las aguas continentales, de transición, costeras y subterráneas con los objetivos siguientes:

- La prevención del deterioro adicional y la protección y mejora de los ecosistemas acuáticos, así como de los ecosistemas terrestres dependientes.
- La promoción de los usos sostenibles del agua.
- La protección y mejora del medio acuático.
- La reducción de la contaminación de las aguas subterráneas.

### **5.3.2. Normativa estatal**

Real Decreto 509/96, de 15 de marzo de 1996, de desarrollo del Real Decreto Ley 11/95, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales (BOE de 29/03/96). Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de Julio de 2001, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas (BOE N° 176 de 24/07/01). Como aspectos más importantes destacan los siguientes:

- Queda prohibido con carácter general, el vertido directo o indirecto susceptible de contaminar las aguas, a cualquier elemento del Dominio Público Hidráulico (DPH), salvo que se cuente con la previa autorización administrativa (art. 100.1).
- La reutilización de las aguas procedentes de un aprovechamiento requerirá concesión administrativa.
- El control de vertidos y sus parámetros (art. 113.1)

A continuación, se nombrarán una serie de leyes, R.D., y ordenes con relación a este trabajo y la depuración y reutilización de aguas residuales procedentes de una actividad minera, como es una cantera de granito:



- Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas.
- Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas.
- Real Decreto 606/2003 de 23 de mayo, por la que se dictan normas complementarias en relación con las autorizaciones de vertidos de aguas residuales.
- Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre de 2007, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.
- Real Decreto Ley 17/2012, de 4 de mayo, por el que se establecen medidas urgentes en materia de medio ambiente. Modifica parte de la ley de aguas RDL 1/2001.
- Orden AAA/2056/2014, de 27 de octubre, por la que se aprueban los modelos oficiales de autorización y de declaración de vertido.

Con respecto a la reutilización de aguas residuales hay que mencionar la Directiva 91/271/CEE, que es modificada por la Directiva 98/15/CE, que define la recogida, tratamiento y vertido de las aguas residuales urbanas. Esta Directiva ha sido transpuesta a la normativa española por el Real Decreto-ley 11/1995, el Real Decreto 509/1996, que lo desarrolla, y el Real Decreto 2116/1998 que modifica el anterior.

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				OTROS CRITERIOS
	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	
<b>3.- USOS INDUSTRIALES</b>					
CALIDAD 3.1' a) Aguas de proceso y limpieza excepto en la industria alimentaria. b) Otros usos industriales.	No se fija límite	10.000 UFC/100 mL	35 mg/L	15 UNT	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. <i>Legionella spp.</i> : 100 UFC/L

*Ilustración 10. Valores máximos admisibles para la reutilización del agua residual. (R.D.1620/2007)*



En la tabla anterior del R.D. 1620/2007, se establecen los valores que deben tener las aguas residuales una vez tratadas, para su reutilización en el sistema. En este caso sería el apartado “Calidad 3.1.” (*Aguas de proceso y limpieza excepto en la industria alimentaria*).

De manera ilustrativa, se presentan los valores requeridos en la citada legislación y con los que se trabajan en este proyecto:

<b>PARAMETROS MAXIMOS DEL AGUA</b>	
Concentración de sólidos suspendidos totales	< 35 mg/l.
DQO	< 150 mg/l.
DBO	< 25 mg/l.
pH	6 - 7.5

*Tabla 4. Parámetros máximos del agua para su reutilización (R.D. 1620/2007)*

Teniendo en cuenta la normativa española y europea en referencia a las aguas residuales, para la recirculación de la dicha agua, los valores que deberá cumplir a la salida del tratamiento serán los valores de la Tabla 5. Dichos valores, además, serán válidos para que el agua residual tratada pueda ser vertida a un cauce, en caso de no poder recircularla, por avería.

Una vez tratadas las aguas se deberán tratar los fangos restantes que se obtengan del tratamiento de las aguas residuales. Se valorarán opciones de tratamiento como puede ser los filtros de prensa, filtros de banda, o máquinas centrifugas, posteriores a un espesado de los lodos.



#### **5.4. Ensayo coagulación - floculación**

En este apartado se describirá el ensayo de laboratorio realizado en el laboratorio de química de la escuela de Ingeniería de Minas de Oviedo, en el que se obtuvo el coagulante y floculante a utilizar, así como sus dosis correspondientes.

El ensayo de coagulación – floculación se realizó en el laboratorio, con el fin de determinar qué tipo de coagulante y que tipo de floculante era el apropiado, con cual se obtenía mejores resultados.

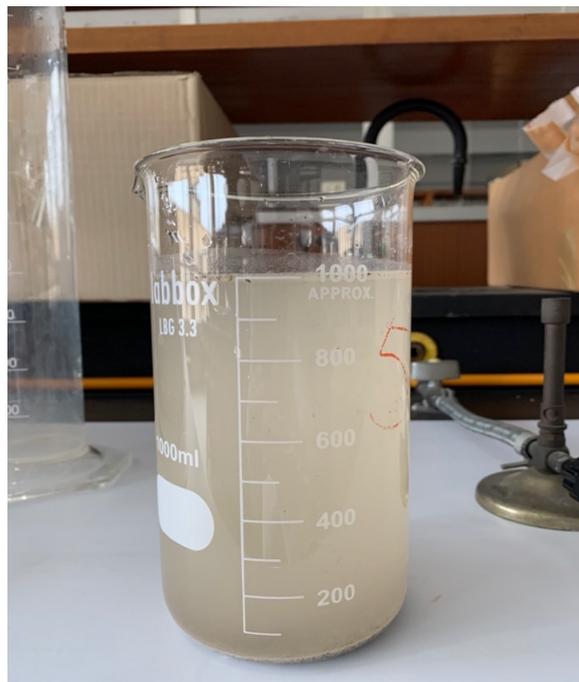
Con el ensayo de laboratorio se obtiene, la cantidad y que tipo de coagulante y floculante funciona mejor. Dado que resultó imposible realizar una toma de muestras en la cantera de granito, se crea un agua residual con el mismo porcentaje en peso que tiene el agua que procede de la cantera, simulando un agua muy aproximada y así poder obtener resultados óptimos.

Dicha agua sintética simulada en el laboratorio contiene un 11,98 % en peso de granito. El granito proporcionado en gran tamaño y se debe triturar hasta conseguir un tamaño de partículas menor a 50 - 60  $\mu\text{m}$ , ya que las partículas de mayor tamaño no pasarán por el tanque de coagulación y floculación, debido a que se eliminan en la etapa anterior de desarenado (Bueno, 1997).



*Ilustración 11. Ensayo laboratorio: pesaje del granito en la báscula.*

A continuación, el granito se mezcla con 1 litro de agua en un vaso de precipitado, en el cual se realizan todos los ensayos correspondientes. Como se puede observar en la siguiente imagen, la turbidez que presenta la mezcla preparada es considerable, y el objetivo de este ensayo es quitar dicha turbidez.



*Ilustración 12. Ensayo laboratorio: Aspecto de la mezcla realizada de agua y granito*



Realizada mezcla, pasados unos minutos y dejando que repose el agua, se observa claramente que en el fondo hay muchas partículas de granito, debido a que es un material de gran densidad, por lo que se tiene en cuenta que un tanque de sedimentación sería óptimo para el diseño del tratamiento de las aguas residuales.

#### 5.4.1. Elección del coagulante

En primer lugar, se ha decidido analizar los siguientes coagulantes:

COAGULANTES		
<b>C1</b>	Cloruro de hierro	$Cl_3Fe \cdot 6H_2O$
<b>C2</b>	Sulfato de aluminio	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$
<b>C3</b>	Sulfato de hierro	$Fe SO_4 \cdot 7H_2O$

Tabla 5. Ensayo laboratorio: Coagulantes utilizados en el ensayo



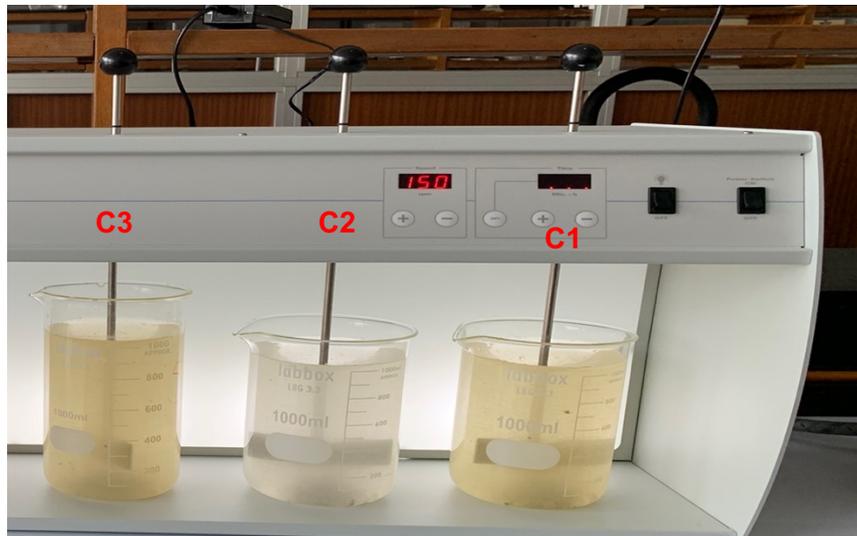
Ilustración 13. Ensayo laboratorio: Coagulantes utilizados en el ensayo. De izquierda a derecha: sulfato de hierro, sulfato de aluminio y cloruro de hierro

Una vez seleccionados los tres coagulantes a utilizar, se preparan otras 2 suspensiones con 11,98 % en peso de granito y 1 litro de agua, para posteriormente dosificar a cada mezcla 4 ml de cada coagulante y así observar posteriormente qué



coagulante será el óptimo a utilizar. Se añaden 4 ml de floculante C1 al vaso 1, 4 ml de floculante C2 al vaso 2 y 4 ml de floculante C3 al vaso 3.

Una vez realizado este proceso se mete en la máquina de homogenización (mezcladora), se realiza el JAR-test y se dejarán los vasos durante 3 minutos a 150 rpm, para posteriormente bajar durante 15 minutos a 150 rpm. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:



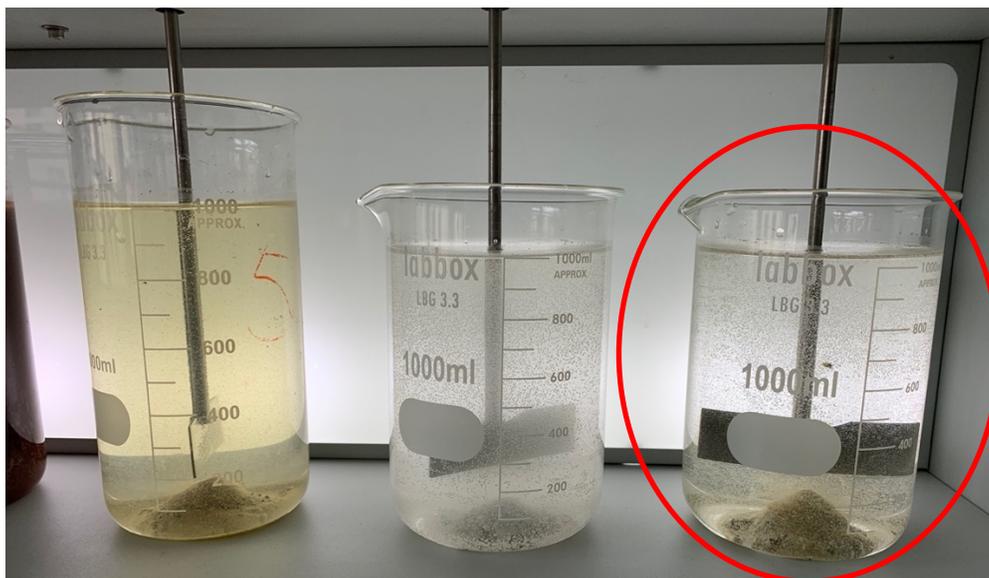
*Ilustración 14. Aspecto de las tres muestras de suspensión de granito tras 3 minutos de mezclado con el coagulante. De izquierda a derecha: sulfato de hierro, sulfato de aluminio y cloruro de hierro*

En esta fotografía se puede observar como la turbidez va disminuyendo y los sólidos en suspensión han decantado en el fondo del vaso precipitado. Además, se observa como el coagulante C1 (cloruro de hierro) y C2 (sulfato de aluminio) actúan de manera más eficaz que el C3 (sulfato de hierro), ya que en esos dos vasos se observa menos turbidez.



*Ilustración 15. Aspecto de las tres muestras de suspensión de granito tras 5 minutos de mezclado con el coagulante. De izquierda a derecha: sulfato de hierro, sulfato de aluminio y cloruro de hierro*

Una vez pasados los 15 minutos a 35 rpm, se bajan las revoluciones hasta que la agitación sea casi nula, con eso se pueden observar los tres vasos precipitadores y finalmente observando el resultado final, el coagulante que mejor funciona para las aguas residuales con granito será el C1, cloruro de hierro ( $Cl_3Fe \cdot 6H_2O$ ). La elección se ha basado en la facilidad que ha tenido para decantar las partículas en el fondo del vaso de precipitado.



*Ilustración 16. Presencia de los vasos de precipitado y elección del coagulante, C1 ( $Cl_3Fe \cdot 6H_2O$ )*



#### 5.4.2. Elección del floculante

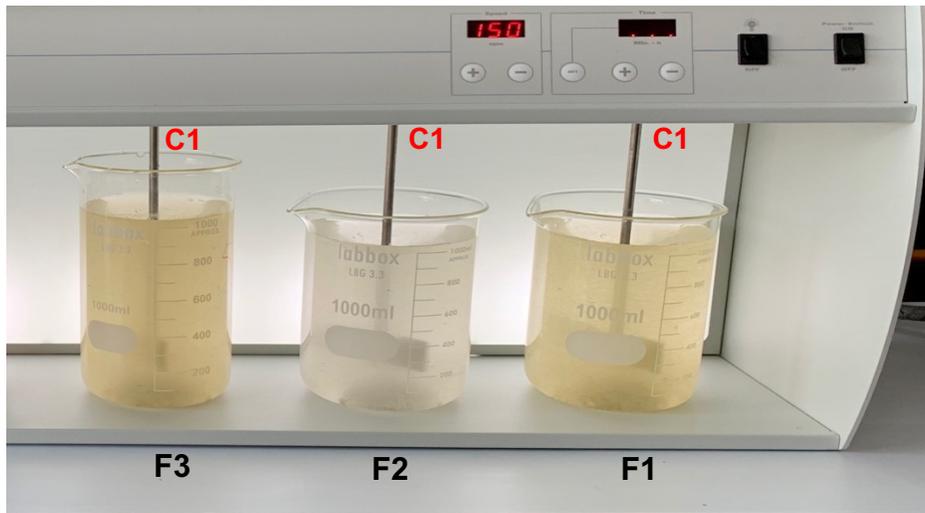
Una vez obtenidos los resultados del coagulante, mediante otro ensayo JAR-test, se decide cual será el floculante que utilizar. Como se explicó con anterioridad, el floculante es un compuesto que hace se aglutinen las sustancias coloidales presentes en el agua y así facilita su decantación y posterior filtrado.

En esta segunda parte, se preparan tres suspensiones de 1 litro de agua añadiendo 11,98% en peso de granito, para simular el agua residual, lo más parecido a la realidad. A dichas suspensiones, se les añade 4 m/l de coagulante (C1- cloruro de hierro) y se introducen en equipo de agitación. Pasados dos minutos se dosifican los siguientes floculantes:

FLOCULANTES	
F1	Aniónico
F2	Neutro
F3	Catiónico

*Tabla 6. Ensayo laboratorio: Floculantes elegidos para el ensayo*

En esta segunda etapa, se añaden otro 4 m/l de floculante simultáneamente, sin que el agua sintética deje de girar. Una vez echado el coagulante C1, se esperan dos minutos y se añaden los floculantes.



*Ilustración 17. Ensayo de laboratorio: Adición de floculante en las mezclas realizadas. De izquierda a derecha: catiónico, neutro y aniónico.*

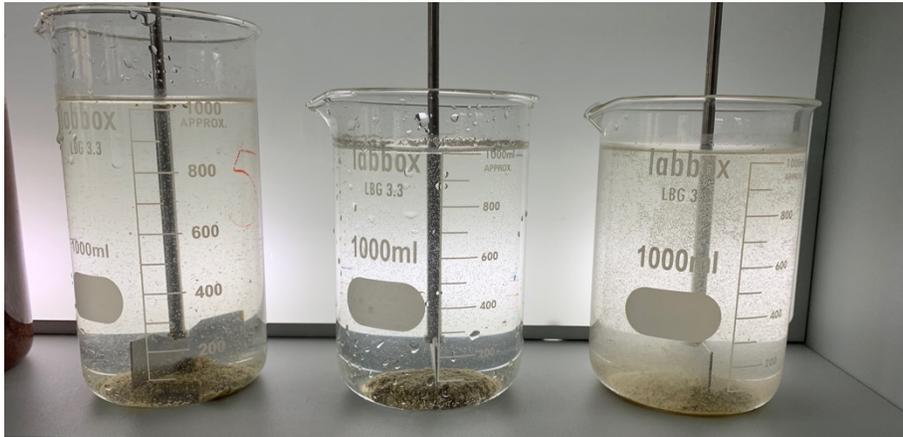
Durante dos minutos, se deja únicamente el coagulante añadido, para que haga su efecto y posteriormente se añaden los floculantes. En el momento de añadir el floculante e iniciar el JAR-test se aprecia turbidez.



*Ilustración 18. Ensayo laboratorio: JAR-test, momento en el que se añade los floculantes*

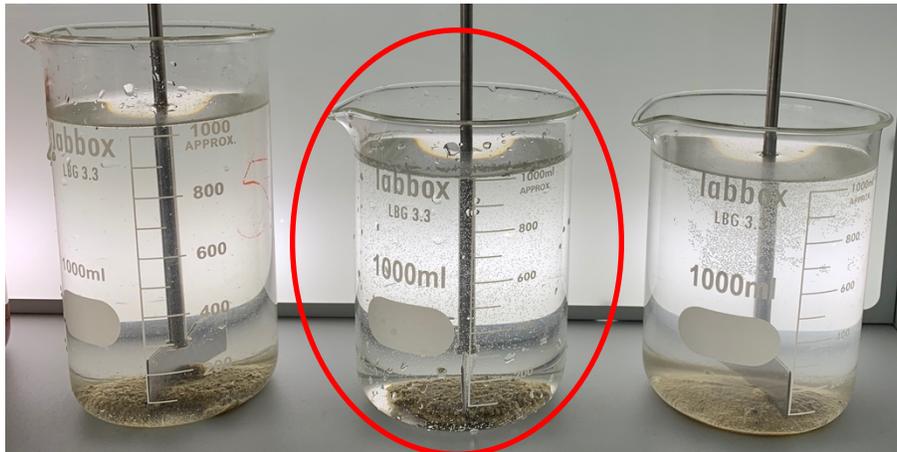


Al cabo de 4 minutos, la adición de coagulantes y floculantes hacen su función. Se observan pequeñas diferencias, en cuanto a la turbidez, entre los tres vasos de precipitación. En el vaso 2 (el del medio) se puede observar como a medida que pasa el tiempo disminuye su turbidez, en cambio, en el vaso 1 y 3, sigue siendo visible.



*Ilustración 19. Aspecto de las tres muestras de suspensión de granito tras 4 minutos de mezclado con el floculante. De izquierda a derecha: catiónico, neutro y aniónico.*

Una vez pasados los 10 minutos, se para equipo de agitación y se espera durante 2 minutos, para ver los resultados finales. Como se observa en la siguiente imagen, los vasos de la izquierda y la derecha, (3 y 1) presentan mayor turbidez, que es lo que se quiere quitar mediante este proceso y que decanten el máximo número de partículas, para añadir un tanque de sedimentación en la etapa posterior a la etapa de coagulación-floculación. Por lo tanto, el floculante seleccionado será el añadido al vaso 2, floculante neutro (F2).



*Ilustración 20. Apariencia final de las tres muestras de suspensión de granito tras 10 minutos de mezclado con el floculante.*

**Floculante:** Floculante Neutro. Es una sustancia química que promueve la floculación al hacer que los coloides y otras partículas suspendidas en los líquidos se agreguen, formando un floculo, y así sedimenten mejor.

En la siguiente imagen, se observa el resultado final de añadir a una mezcla de 11,98% en peso de granito y agua, 4 m/l de coagulante (Cloruro de hierro) y 4 m/l de floculante (Neutro). Se ha realizado un JAR-test, y es posible ver que, a la hora de diseñar una estación de depuración de aguas residuales procedentes de la cantera de granito, será imprescindible, añadir tanto un tanque de coagulación como un tanque de floculación, con el fin de que las partículas decanten en el menor tiempo, y de la mejor manera posible.



*Ilustración 21. Ensayo laboratorio: Resultado final de la muestra con la adición de coagulante y floculante*

En la imagen anterior, en la parte de arriba, se observa que se han adherido partículas al lateral del vaso y que hay una serie de partículas que no han sedimentado (como se observa en la siguiente imagen), posiblemente sean impurezas que arrastra el granito, ya sea musgo, o partículas de otro mineral. Se añadirá un equipo de sedimentación seguido a la etapa de floculación – coagulación para tener una mayor eficacia en el sistema.



*Ilustración 22. Aspecto que presenta el interior vaso precipitación, se aprecian sólidos en suspensión.*



## 6. TRATAMIENTO SELECCIONADO

Una vez determinados los objetivos a los que hay que llegar tratando el agua residual procedente de una cantera de granito, y conociendo los parámetros con los que llegará el agua a tratar, se realizará la selección de los equipos a utilizar.

- **Parámetros de entrada del influente:**

PARÁMETROS	VALORES	UNIDADES
Caudal	250	m <sup>3</sup> /h
pH	7,9	-
Color	Gris (muy apreciable)	-
Dureza total	113	mg/l de CaCO <sub>3</sub>
Sólidos suspendidos totales SST (110 °C)	211	mg/l
DQO	180	mg O <sub>2</sub> /l
Turbidez	Agua muy turbia	UNT
Hidrocarburos totales	< 0,84	mg/l

*Tabla 7. Parámetros que posee el agua residual en la entrada al sistema*

- **Objetivos de salida del influente:**

PARÁMETROS	VALORES	UNIDADES
Caudal	250 (- pérdidas)	m <sup>3</sup> /h
pH	6 - 7,5	-
Color	Inapreciable (1/20)	-
Dureza total	50	ppm
Sólidos suspendidos totales SST (110 °C)	35	mg/l
DQO	150	mg O <sub>2</sub> /l
DBO	25	mg/l
Turbidez	Inapreciable	UNT

*Tabla 8. Objetivos de salida del agua residual en la planta*



El caudal de entrada será de 250 m<sup>3</sup>/h de agua residual procedente de la cantera de granito, la cual se transportará mediante bombas hasta el sistema de depuración de aguas. Sabiendo que las partículas de granito, existentes en el agua residual tendrán un tamaño inferior a 100 µm, y que el máximo rendimiento en la etapa de tratamiento primario se consigue con un tamaño de partículas inferior a 50 – 60 µm, se deberá iniciar el proceso con un pretratamiento. Al tratarse en todo momento de material granito y de pequeño tamaño de partículas, el proceso idóneo de pretratamiento sería añadir una etapa de desarenado del agua residual. (Gomez Nieto & Hontoria Garcia, 2006)

Lo que se pretende realizar con esta etapa de desarenado es, eliminar los sólidos suspendidos de mayor tamaño susceptibles de sedimentar por gravedad. Se pretende evitar que suceda lo de la ilustración 23. Mediante esta etapa, se consigue evitar sedimentos en las tuberías, proteger bombas de la abrasión, evitar sobrecargas posteriores y hacer que el rendimiento del tratamiento primario sea más efectivo.

Normalmente, esta etapa suele juntarse con la etapa de desengrasado. Como en este caso (con los datos aportados por la empresa) se observa que los aceites y grasas tienen un valor pequeño, que entra dentro de la legislación máxima admisible, no será necesario añadir la etapa de desengrasado.

El agua residual procedente del desarenador se transportará a continuación a la etapa de sedimentación (tratamiento primario), en la cual se realizará la eliminación de las partículas más finas. En esta etapa, el sistema de tratamiento tendrá tres procesos. Con el fin de favorecer la sedimentación, antes del tanque de sedimentación se añadirán los siguientes equipos:

- **Tanque de coagulación:** donde realizará la mezcla con el coagulante, cloruro de hierro (C1) para desestabilizar a las partículas coloidales.
- **Tanque de floculación:** en el cual se introducirá un floculante neutro, con el objetivo de facilitar la formación de agregados de partículas de mayor tamaño y aumentar su velocidad de sedimentación.



Posteriormente, se añadirá un tanque de sedimentación, que mediante el uso del programa GPS-X, se optimiza y se introduce su superficie correspondiente. Mediante este equipo se quiere que sedimenten los flóculos formados anteriormente y se eliminan mediante un sistema de barrido. El problema de este tanque es que genera una cantidad de lodos importante, como se observará al modelizar en el GPS-X, los cuales habrá que tratarlos mediante un filtro de prensa o filtros banda, ya que es necesario perder la menor cantidad de agua posible, para su posterior recirculación.

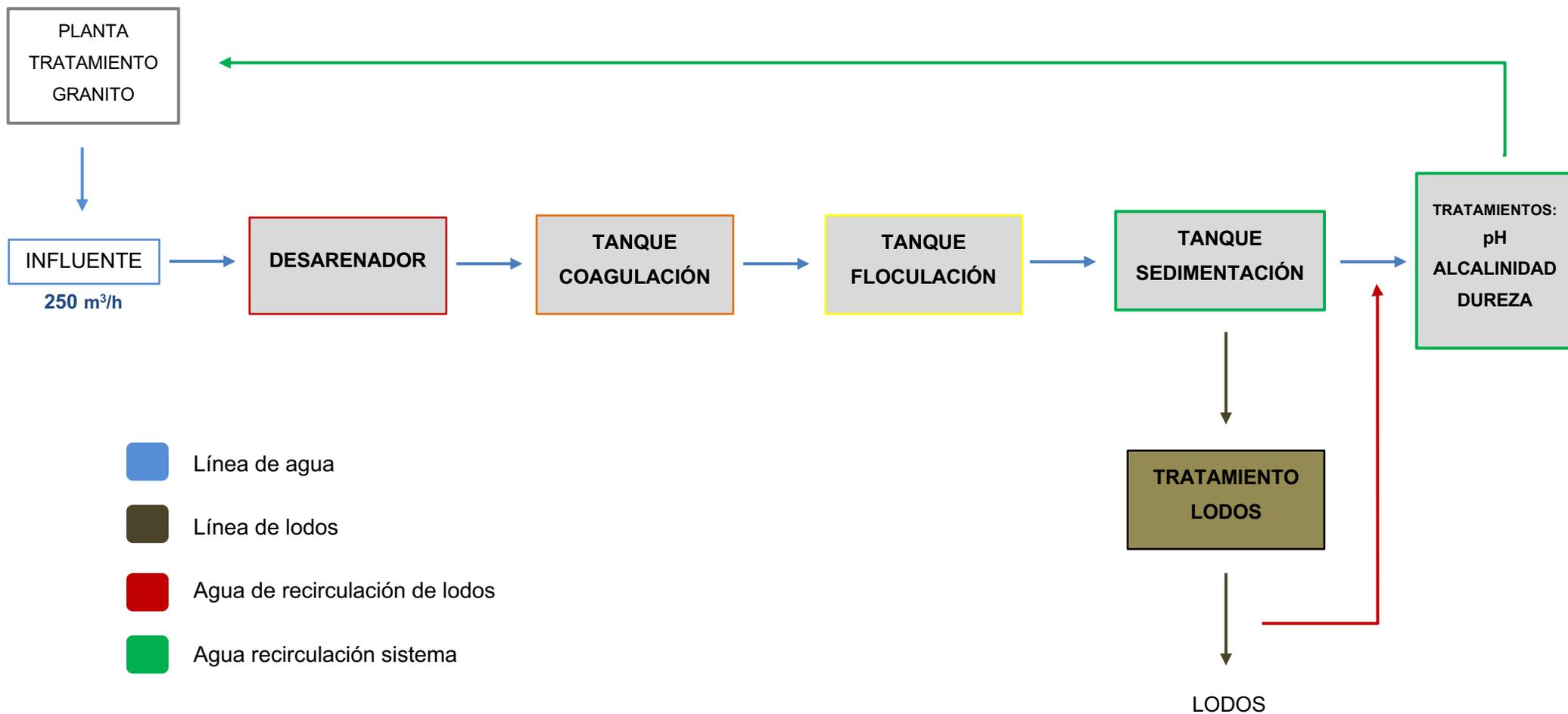
Una vez modelizado y diseñado el sistema, en el programa GPS-X, se valorará según los datos obtenidos añadir diferentes equipos, con el fin de mejorar el pH, conseguir un agua residual con menor dureza o reducir su alcalinidad.

Modelizando y diseñado estos procesos de tratamiento, en el programa GPS-X, se obtendrá un agua clarificada con reducida carga de sólidos suspendidos y DQO, por lo que se podrá proceder a su recirculación a la planta de granito cumpliendo con las exigencias establecidas por la legislación vigente (Tabla 5. Parámetros máximos del agua. (R.D. 1620/2007). A continuación, se especifica el proceso de tratamiento mediante un diagrama de bloques sencillo.



### 6.1. Diagrama de flujo

Este diagrama de flujo será un esquema general, en el cual vienen ilustradas las etapas principales. Es posible que sufra modificaciones una vez se introduzca en el programa GPS-X y se observen los valores obtenidos.





## 6.2. Dimensionamiento de los equipos

A continuación, se procede a dimensionar los equipos a utilizar, para posteriormente insertar en el programa GPS-X los valores obtenidos y así poder optimizar y facilitar las simulaciones.

### 6.2.1. Desarenador

El desarenador será la primera etapa de tratamiento de las aguas residuales procedentes de la planta de granito. En este equipo se eliminarán las partículas más gruesas cuya velocidad de sedimentación sea aceptable desde el punto de vista operativo de la instalación y sin la adición de reactivos químicos.

Para el dimensionamiento de este equipo se utilizará el caudal de entrada y la velocidad de sedimentación de las partículas ( $V_s$ ), según la ley de Stokes.

Las partículas menores de  $50\ \mu\text{m}$  tienen velocidades de sedimentación muy bajas, del orden de  $2\ \text{mm/s}$ . (Mijares, 1978). Para lograr la sedimentación de estos tamaños de partícula serían necesarios tiempos de residencia muy elevados, lo que implicaría sobredimensionar al área superficial necesaria y por tanto el equipo, aumentando su coste. Por ello, el desarenador se dimensionará para garantizar la sedimentación de las partículas de tamaño superior a  $50\ \mu\text{m}$  y las partículas menores se separarán en una etapa posterior mediante la adición de reactivos. Aunque posteriormente, los datos obtenidos se podrán optimizar y modificar en el GPS-X. (Metcalf & Eddy, 2003).

Por lo tanto, tras la operación de desarenado, sabiendo los datos aportados por la cantera, en cuanto a granulometría, se obtendrá un efluente clarificado con una concentración de aproximadamente  $3500\ \text{mg/l}$  de sólidos en suspensión de tamaño  $< 50\ \mu\text{m}$ .



El área superficial del desarenador ( $A_s$ ) se calculará como el cociente entre el caudal de agua a tratar ( $250 \text{ m}^3/\text{h}$ ) y la velocidad límite de sedimentación ( $2\text{mm/s}$ ), como se muestra en la siguiente ecuación.

$$A_s = \frac{Q}{V_s} \qquad A_s = \frac{250 \text{ m}^3/\text{h}}{0,002 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}}} = 34,7 \text{ m}^2$$

El área superficial será de  $34,7 \text{ m}^2$ . Como se considera que la altura de la lámina de agua será de 1 metro, la altura del desarenador deberá ser de aproximadamente 30% más, para así evitar salpicaduras y desbordamientos (Mijares, 1978). Para la anchura y longitud, se recomienda una proporción de 1:7. A continuación se resumen en la tabla los valores que se introducirán posteriormente en el programa, en el equipo de desarenado.

Dimensiones desarenador	
Volumen	45,5 m <sup>3</sup>
Área superficial ( $A_s$ )	35 m <sup>2</sup>
Longitud	14 m
Anchura	2,5 m
Altura	1,3 m

Tabla 9. Resumen de dimensiones del equipo de desarenado

### 6.2.2. Tanque de coagulación

El agua residual que procede de la planta de granito y pasa por la fase de desarenado, se alimenta al tanque de coagulación. En este tanque se le añade cloruro de hierro ( $\text{Cl}_3\text{Fe} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) como coagulante, con el fin de favorecer la sedimentación en la etapa de sedimentación.



Se debe medir el tiempo de residencia necesario para la coagulación, como parámetro fundamental para calcular las dimensiones del tanque de coagulación. Dicho dato se ha obtenido a partir de los ensayos realizados en el laboratorio, que se estimó en 5 minutos.

Por lo tanto, el volumen del tanque de coagulación se obtendrá de la siguiente manera:

$$V = t_R \cdot Q$$

Donde,

$t_R$  = tiempo de residencia en el tanque de coagulación (h).

$Q$  = caudal de agua residual a tratar ( $m^3/h$ )

$$V = 5 \text{ min} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \times 250 \frac{m^3}{h} = 20,83 \text{ m}^3$$

Se deberá sobredimensionar el resultado obtenido, para evitar pérdidas y salpicaduras, del agua residual junto con el cloruro de hierro. Se sobredimensionará un 30% y se realizará un tanque circular, por su facilidad para eliminar el agua con el coagulante para su correcto mezclado.

<b>Dimensiones tanque coagulación</b>	
<b>Volumen</b>	27 $m^3$
<b>Área superficial (As)</b>	9 $m^2$
<b>Altura</b>	3 m
<b>Radio</b>	1,7 m

*Tabla 10. Resumen de dimensiones del tanque de coagulación*



### 6.2.3. Tanque de floculación

Una vez que el agua residual pasa por el tanque de coagulación y se mezcla con cloruro de hierro, se dirige al tanque de floculación donde se añadirá el floculante, para agrupar las partículas coloidales que han sido desestabilizadas en la etapa anterior, y ayudar a eliminar la turbidez. En la práctica realizada en el laboratorio se observó que junto con el cloruro de hierro el floculante a añadir, debía ser un floculante neutro. Además, se observó que el tiempo de residencia en el tanque de floculación debía ser de 10 minutos. (Metcalf & Eddy, 1995)

Por lo tanto, el volumen del tanque de floculación se obtendrá de la siguiente manera:

$$V = t_R \cdot Q$$

Donde,

$t_R$  = tiempo de residencia en el tanque de coagulación (h).

$Q$  = caudal de agua residual a tratar ( $m^3/h$ ).

$$V = 10 \text{ min} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \times 250 \frac{m^3}{h} = 41,66 \text{ m}^3$$

Al igual que en el tanque de coagulación, se deberá sobredimensionar el resultado obtenido, para evitar pérdidas y salpicaduras, del agua residual junto con el cloruro de hierro. Se sobredimensionará un 30% y se realizará un tanque circular, por su facilidad para remover el agua con el coagulante para su correcto mezclado.

Dimensiones tanque floculación	
Volumen	54 $m^3$
Área superficial (As)	18 $m^2$
Altura	3 m
Radio	2,4 m

Tabla 11. Resumen de dimensiones del tanque de floculación



#### 6.2.4. Tanque de sedimentación

En este tanque de tratamiento primario, se tratará de eliminar los sólidos en suspensión sedimentables de granito por diferencia de densidad entre las partículas suspendidas. Los procesos anteriores de coagulación y floculación harán que sea más fácil eliminar dichas partículas.

En esta etapa, se tratarán de eliminar el mayor número de partículas, para conseguir reducir el número de SS entre un 60% - 65%, reducir la DBO5 entre un 25 - 40 % y conseguir una homogeneización parcial de los caudales (De Luis Alvarez, 2013). El dimensionamiento inicial, hará que una vez introducidos los datos en el programa los simule con mayor rapidez. A la hora de diseñar el tanque de sedimentación se tienen como parámetros principales de diseño la carga de superficie y el tiempo de residencia necesario para que los sólidos suspendidos en el agua residual sedimenten. Este tiempo, en condiciones de caudal medio, se suele estimar entre 1,5 y 2 horas, para así poder garantizar la sedimentación de todas las partículas. (Metcalf & Eddy, 1995)

Para diseñar el tanque de sedimentación se considerará como tiempo de residencia un valor típico de 2 horas y como carga superficial un valor de 1,25 m<sup>3</sup>/ m<sup>2</sup> h. (Metcalf & Eddy, 1995). Estos valores se introducirán en las siguientes formulas:

$$V = Q \cdot t_R \quad V = 250 \text{ m}^3/\text{h} \times 2 \text{ h}$$

$$V = 500 \text{ m}^3$$

Para obtener la altura necesaria del tanque sedimentador será necesaria sacar el área superficial de el mismo, que se obtiene mediante la división entre caudal de entrada y la carga superficial elegida (1.3 m<sup>3</sup>/ m<sup>2</sup> h):

$$\text{Area superficial} = \frac{Q}{\mathcal{F}}$$

$$\text{As (sedimentador)} = \frac{250 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{1,25 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2\text{h}}} = 200 \text{ m}^2$$



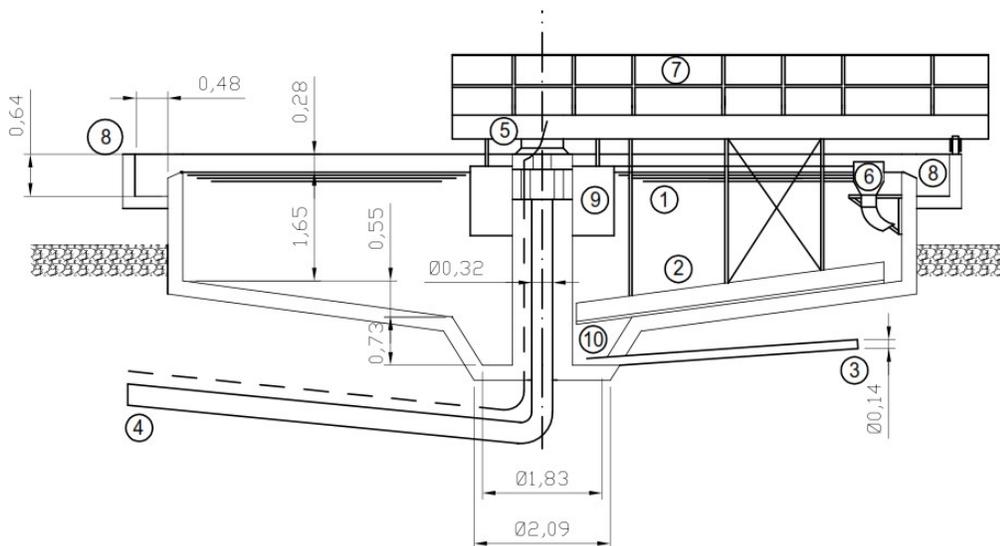
Finalmente, el tanque de sedimentación a utilizar será circular, ya que con partículas de pequeño tamaño y para minerales como el granito, obtiene mayores rendimientos. (DE LUIS ALVAREZ, 2013).

Dimensiones tanque sedimentación	
Volumen	500 m <sup>3</sup>
Área superficial (As)	200 m <sup>2</sup>
Radio	7,98
Altura	2,5 m

Tabla 12. Resumen de dimensiones del equipo de sedimentación

Los lodos obtenidos en el tanque de sedimentación se bombearán hasta la etapa de tratamiento de fangos, donde se reducirá el volumen y la humedad de estos para, finalmente, transportarlos hasta vertedero o destinarlo a otros usos. La etapa de tratamiento de fangos tendrá 4 divisiones, espesamiento de fangos, estabilización, deshidratación y secado (mediante filtros de prensa) y una evaluación final, que será necesaria para decidir a que destinarlo. (Fernandez, 2013)

### Sección modelo del tanque de sedimentación:



1. Rasqueta de superficie
2. Rasqueta de fondo
3. Salida de fangos DN- 150mm
4. Entrada agua DN- 350 mm
5. Moto - reductor
6. Salida de flotantes
7. Puente radial
8. Vertedero efluente
9. Campana deflectora
10. Poceta de fangos

Ilustración 23. Sección modelo que tiene tanque de sedimentación.



## 7. DISEÑO DEL PROCESO CON GPS-X

### 7.1. Acerca del software

El GPS-X, programa que se utilizará para realizar este trabajo es un *software premium* de modelado y simulación de agua y aguas residuales. Es una herramienta muy avanzada para el modelado matemático, control, optimización y gestión de plantas de tratamiento de aguas residuales. Para resolver el modelo de diseño y la simulación de la estación depuradora del agua con granito se seleccionó el software GPS-X, debido a que es una herramienta poderosa que cuenta en sus librerías con unidades de tratamiento novedosas y permite realizar tareas de modelado y simulación. Además, el GPS-X es un software aplicado a la simulación de depuradoras que permite la optimización de cualquier parámetro y su posterior modelización.

Las principales funciones que tiene este programa y que se utilizarán son:

- Etapa de diseño, dimensionamiento y análisis de las condiciones de operación.
- Hacer análisis de sensibilidad, la variación de un parámetro como cambia en los datos finales a obtener.

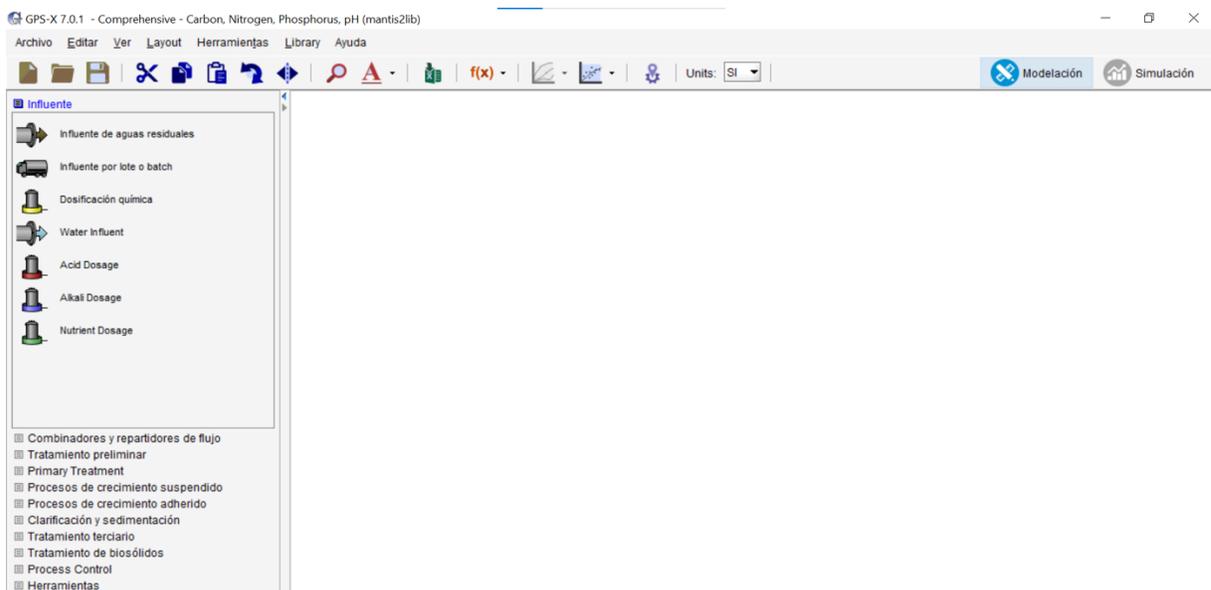


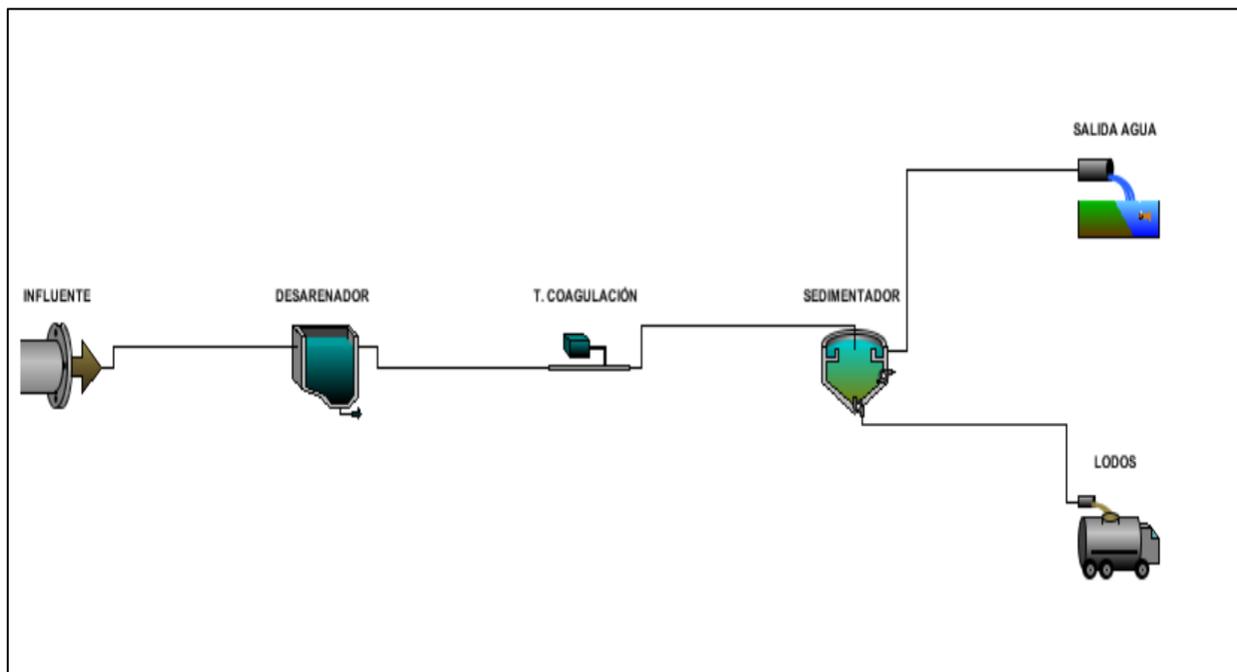
Ilustración 24. Pantalla principal que se observa al abrir el programa GPS-X.



## 7.2. Esquema inicial GPS-X

A continuación, se muestra el esquema inicial creado en el programa GPS-X. Este esquema posteriormente será simulado hasta obtener los valores óptimos de salida y se valorará el añadir más equipos en caso necesario.

El diseño preliminar del diagrama de flujo, que representa la depuradora de agua residual, consiste primeramente en el influente que lleva el fluido hasta el desarenador, el cual realiza el pretratamiento, posteriormente irán la etapa de coagulación y la etapa de floculación (que esta etapa se introduce dentro del sedimentador), y por último se tiene un sedimentador que expulsa una parte de agua limpia y otra parte de lodos, a los cuales se les aplica su correspondiente tratamiento. (SOFTWARE GPS-X, s.f.)



*Ilustración 25. Esquema inicial creado en el programa GPS-X*

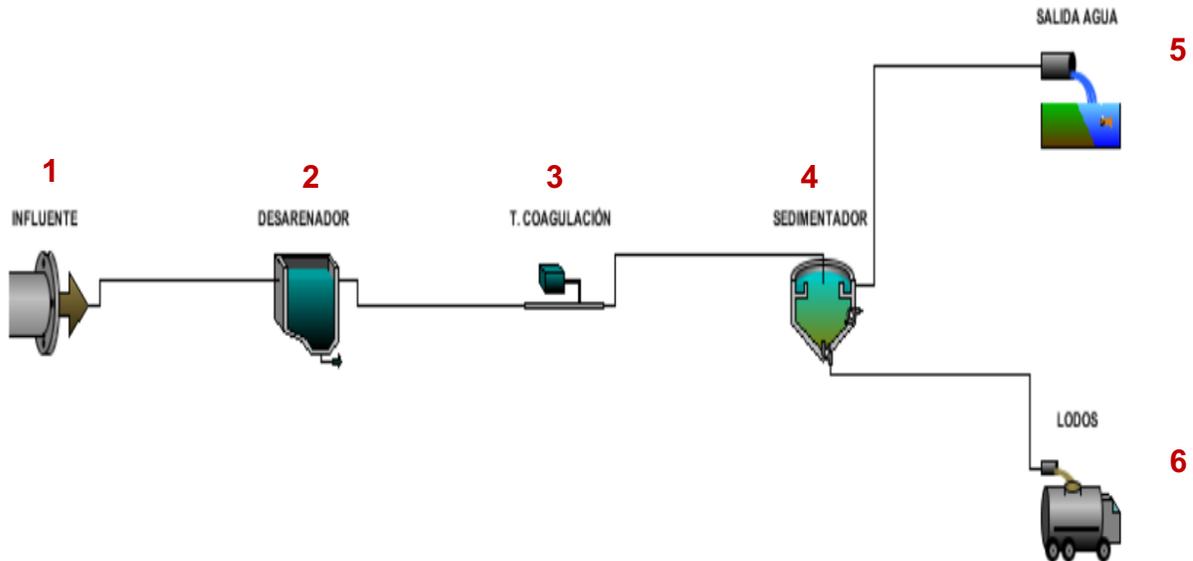


Ilustración 26. Diferentes equipos seleccionados, GPS-X

### Equipos utilizados:

1. **Influente:** Agua de entrada.
2. **Desarenador:** Pretratamiento. Eliminar partículas de  $< 50 \mu\text{m}$ .
3. **Tanque de coagulación:** Tratamiento primario. Se añade cloruro de hierro.
4. **Sedimentador:** Se eliminan las partículas de tamaño inferior a  $50 \mu\text{m}$ . Se añade floculante neutro.
5. **Efluente:** Se extrae agua limpia en función de la legislación vigente. Se recicla a la planta de tratamiento de granito.
6. **Lodos:** Se extraen los lodos producidos en el sedimentador. Se secan y se deshidratan para poder reciclar el agua que tienen dichos lodos.



### 7.3. Modificación esquema inicial

Una vez creado el esquema principal, se deben introducir los datos de cada equipo seleccionado, lo más parecido a la realidad posible. Y para ello se han introducido los datos calculados en el apartado 6.2., los datos introducidos en primera instancia son los siguientes:

#### **Influente:**

- Flujo: 250 m<sup>3</sup>/h.
- DQO total: 180 mg/L

#### **Desarenador:**

- Producción de arena por flujo: 3500 mg/L

#### **Tanque coagulación:**

- Cloruro de Hierro
- 4 mg/L
- Porcentaje cloruro férrico: 50%

#### **Sedimentador:**

- Superficie: 200 m<sup>2</sup>
- Profundidad: 2,5 m

Una vez se introducen todos los datos en cada equipo, se debe simular el sistema para obtener los datos a la salida del agua limpia y de los lodos. Para ello el programa dispone de dos pestañas en la parte derecha de la pantalla, una de modelación, que es la parte donde se crea el esquema y se introducen los datos y otra pestaña donde se crea la simulación. Para que simule el programa se debe dar al botón de *play* (abajo a la izquierda) y una vez terminada la simulación se obtienen los datos a la salida de agua limpia. En la siguiente imagen se observa la pantalla de simulación del programa. En la parte de la derecha y una vez simulado salen los datos de salida de agua limpia.

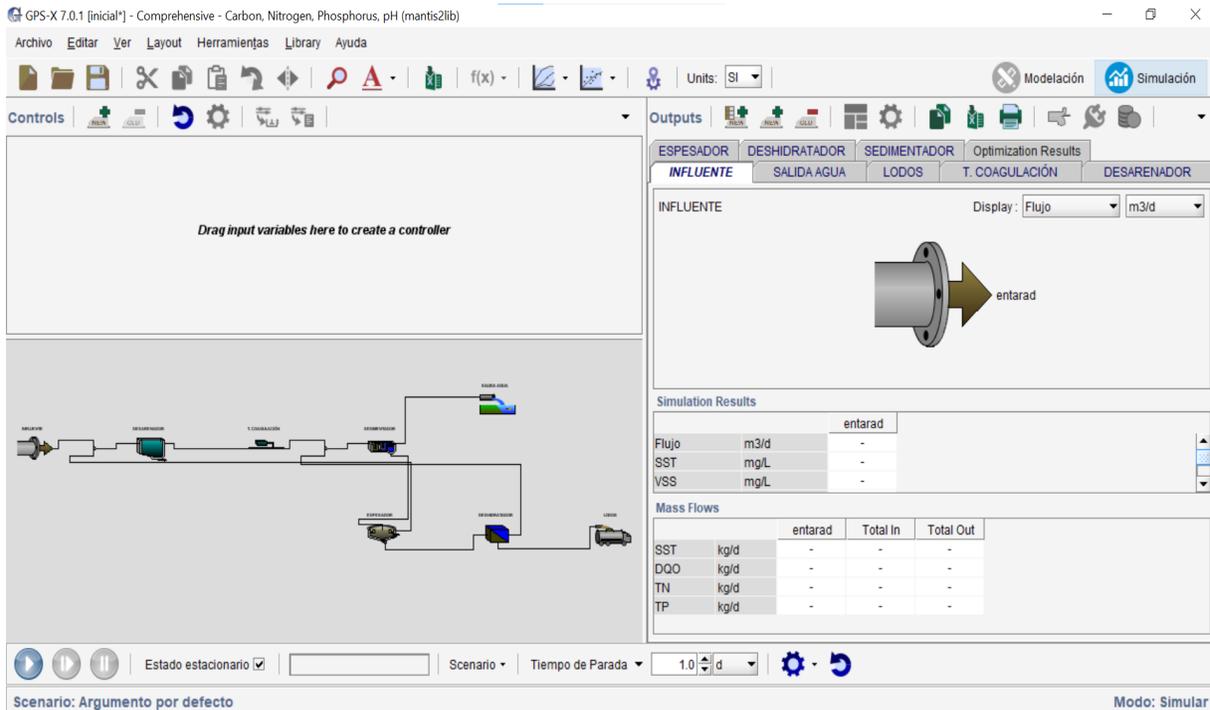


Ilustración 27. Pantalla de simulación del programa GPS-X

Se simula el programa con “tiempo de parada” de 1 día, para que se simule en el menor tiempo posible y se observan los siguientes resultados:

### Simulation Results

		SALIDA DE AGUA
Flujo	m <sup>3</sup> /d	5760
SST	mg/L	75,71
VSS	mg/L	15,45
cBOD5	mg/L	49,58
DQO	mg/L	135,31
Ammonia N	mgN/L	25
Nitrite N	mgN/L	1,5E-84
Nitrate N	mgN/L	1,5E-84
NKT	mgN/L	30,16
TN	mgN/L	30,16
Soluble PO4-P	mgP/L	8
TP	mgP/L	8,46
Total Alkalinity	mgCaCO3/L	287,28
pH	-	7

Tabla 13. Datos que posee en la salida el agua residual (esquema inicial)



Los datos obtenidos en el programa GPS-X, se pueden trasladar a excel, obteniendo una tabla idéntica a la Tabla 14. Teniendo los datos de salida del agua limpia en el programa y los datos que exige la ley para poder recircular el agua al propio sistema se debe valorar si ese sistema será el adecuado.

Observando los datos, se tienen unos valores de sólidos suspendidos totales (75,7 mg/l) y de DBO<sub>5</sub>, (49,58 mg/l) mayores a lo que marca la legislación, aunque la DQO (135 mg/l) este dentro de los parámetros vigentes, hace indicar que este esquema debe sufrir modificaciones. El flujo de agua de salida es de 5760 m<sup>3</sup>/h, algo por debajo de los 6000 m<sup>3</sup>/h, que se deben recircular al sistema para el tratamiento del granito, lo que indica que del sedimentador habrá que realizar una recirculación y un sistema de tratamiento de lodos, para conseguir recircular el mayor número de agua limpia posible, y que los lodos sean más fáciles de tratar, al haber sufrido un tratamiento previo (espesado y deshidratación).

Al no haber podido incluir el floculante en el sedimentador circular, ya que el programa no lo permite en dichos sedimentadores, se debe cambiar este por un sedimentador “*high-rate*”, para así poder añadir el floculante al sistema. Por lo tanto, a continuación, se mostrará el esquema modificado.

Con este esquema se trabaja optimizando los parámetros principales, para obtener valores de agua limpia capaces de ser recirculados en la planta de tratamiento de granito, y con él se realizarán diferentes estudios de sensibilidad, para saber cómo funciona el sistema en caso de que existan diferentes problemas.

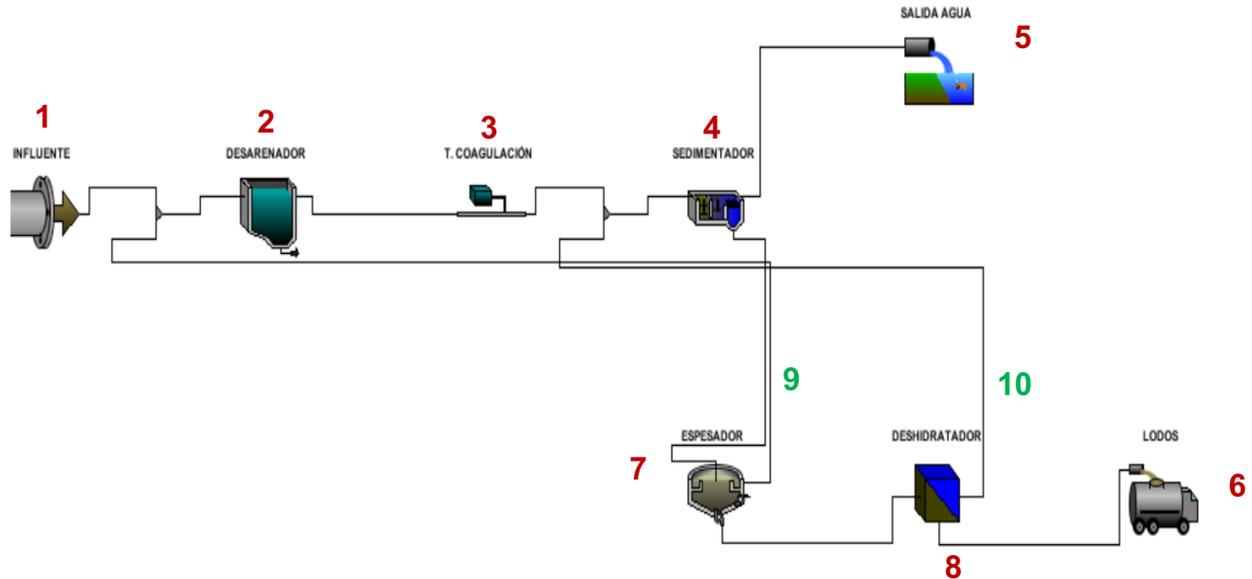


Ilustración 28. Modificación del esquema inicial creado en el GPS-X

Las principales modificaciones del sistema:

- Se intercambia el sedimentador (4) “Clarificador primario circular”, por un sedimentador “High Rate Treatment”, con el fin de añadir el floculante en dicho sedimentador.
- Se añade un sistema de tratamiento de fangos, el cual cuenta con un espesador y un deshidratador de lodos, con el fin de recircular la mayor cantidad de agua posible, ya que de dichos equipos se recircula el agua en el sistema (9 y 10) y conseguir unos lodos secos, fácilmente transportables.
- Los valores obtenidos en la simulación de dicho esquema, tanto en la salida del agua limpia (5), como en la salida de lodos (6), variarán respecto a los obtenidos en el esquema inicial.

A continuación, se introducirán los parámetros a cada equipo seleccionado en el sistema principal.



#### 7.4. Introducción de datos

Una vez creado el equipo inicial, y antes de obtener la primera simulación, se introducirán los datos correspondientes a cada equipo, calculados anteriormente, para que, a la hora de realizar la primera simulación, los datos sean lo más cercanos a la realidad.

El programa tiene dos pestañas, una de modelización y otra de simulación. En la de modelización, se creará el esquema de la planta de tratamiento para las aguas de granito y en el sistema de simulación se obtendrán los datos finales de salida de agua y lodos.

Tras realizar el diagrama y etiquetar los componentes con sus respectivos nombres, se introducen los parámetros al diagrama. Habrá que dar clic derecho sobre el influente e introducir el dato en la pestaña “Flujo”.

Como se puede observar a continuación, se introduce un caudal inicial al influente de 250 m<sup>3</sup>/h.

The screenshot shows a dialog box titled "Datos de flujo". It has three main sections: "Tipo de Flujo" with a dropdown menu set to "Datos"; "Datos" with a text input field containing "250.0" and a unit dropdown set to "m3/h"; and "Otras opciones de flujo" with a "Más ..." button. At the bottom, there are "Aceptar" and "Cancelar" buttons.

Ilustración 29. GPS-X. Dato introducido como flujo de entrada en el sistema

A continuación, en el influente se introducirán los datos iniciales de la composición de ese caudal. Dando clic derecho, “Composición” y posteriormente “*Influent characterization*”



Una vez dentro de esa pantalla, saldrán unos datos como los que salen a continuación, antes de la modificación. En dicha pantalla se deberán introducir los datos del influente.

Ilustración 30. GPS-X, Pantalla “Influent characterization”

En este esquema se deberá introducir una DQO total de 180 mg O<sub>2</sub>/l. Los valores de la parte derecha de la pantalla, los calculará el programa.

User Inputs			
Influent Composition			
cod	DQO total	gCOD/m3	180.0
tkn	NTK total	gN/m3	40.0
tp	fósforo total	gP/m3	10.0
Nitrogen Compounds			
snh	nitrógeno del amoníaco	gN/m3	25.0
snoi	nitrito	gN/m3	0.0
snoa	nitrato	gN/m3	0.0

Ilustración 31. GPS-X. Datos introducidos como DQO del agua residual



Nuevamente dentro del influente, se deberán introducir datos de temperatura y de pH, dichos datos se introducirán en la pestaña de “Environmental setting”. Al no tener la temperatura en cada equipo, se deberá activar el botón de encendido. Para que el propio programa vaya calculando las temperaturas.

Por otra parte, y como se menciona en los apartados previos, el pH que posee el agua residual procedente de la planta de tratamiento del granito será de 7,9. (minera, 2021).

Environmental Setting	
<b>Temperature Setting</b>	
[entrad] use local temperature	Encen... Apagar
[entrad] local liquid temperature	20.0 C
<b>pH setting</b>	
[entrad] Influent pH	set pH
[entrad] Set pH	7.9 -
Aceptar Cancelar	

Ilustración 32. GPS-X. Datos introducidos de temperatura y pH

A continuación, se introducen los datos de la etapa de pretratamiento, en la cual se ha introducido un desarenador. Dichos datos se han calculado en el apartado anterior (6.2.1 Desarenador), y como en el proceso anterior, mediante el botón derecho, y posteriormente entrando en los parámetros de entrada, se introducen los datos físico y operacional del desarenador.

Nuevamente se encenderá la pestaña de la temperatura, para que haga un control sobre ella y en los datos operacionales se introducirá una producción de arena por flujo de 3500 mg/l, teniendo en cuenta el tamaño de partículas que se tienen.



Operacional

[exitdesa] producción de arena por flujo 3500.0 mg/L

Aceptar Cancelar

Ilustración 33. GPS-X. Dato: producción de arena por flujo en el desarenador

Siguiendo el orden del esquema inicial, se introducen los datos al tanque de coagulación. En este caso no permite aportar datos de dimensión. Únicamente se introducirá que el coagulante a utilizar será el cloruro de hierro ( $Cl_3Fe \cdot 6H_2O$ ), dato que se obtuvo realizando ensayos de laboratorio. Así como el porcentaje de cloruro de hierro a la salida (50%) y una “chemical dosage, mass based” de 20 kg/d.

Dosificación química

[exitcoagu] chemical type ferric chloride-FeCl3

[exitcoagu] modo de dosificación mass based

Aceptar Cancelar

Ilustración 34. GPS-X. Dato introducido de coagulante seleccionado.

A la hora de introducir los datos en el sedimentador “high rate”, se introducirá primero el floculante a utilizar, en este caso un floculante neutro. Con el botón derecho y entrando en el apartado “operacional”, se introduce la cantidad de 4 mg/l de floculante neutro. Como se muestra en la siguiente imagen.

Polymer Dose

[exitlimpia] polymer addition method flow based

[exitlimpia] polymer dose 4.0 mg/L

[exitlimpia] polymer mass feed rate 0.0 kg/d

Aceptar Cancelar

Ilustración 35. GPS-X. Dato introducido, dosis del coagulante.



Una vez introducidos los anteriores datos y con el fin de que el esquema funcione de la mejor manera posible, será necesario antes de introducir los datos en el sedimentador, calcular el flujo de lodos que se genera en el proceso de floculación. Para este cálculo se deberá tener en cuenta que una bomba normal a la salida del sedimentador no puede trabajar con más de un 3-5 % de sólidos. Con ello se obtendrá un caudal que se introducirá en los datos operacionales de salida de lodos del sedimentador.

Para introducir los parámetros de entrada en el espesador se deberá realizar el mismo cálculo anterior, pero en este caso se alcanzará una concentración de sólidos del 10%. (Metcalf & Eddy, 1995).

Los lodos obtenidos en el tanque de sedimentación se bombearán a través de tubería hasta el espesador, donde se reducirá el volumen y la humedad de estos para, finalmente, transportarlos hasta vertedero o destinarlo a otros usos. Sabiendo que se tiene un caudal de entrada de 250 m<sup>3</sup>/h (6.000.000 L/d) y que en la entrada del sedimentador hay 79, 83 mg/l de sólidos y en la salida hay 29,8 mg/l de sólidos (valor que se obtiene posteriormente mediante optimizaciones), se obtienen los sólidos en seco que se sacan del sedimentador. Existe una diferencia de sólidos entre la entrada y la salida de 50,03 mg/l, que multiplicada por el caudal (6.000.000 L/d), por lo tanto, el *mlo*do seco será de 12,50 kg/h.

Una vez realizado el cálculo y sabiendo que por las bombas del sedimentador no pasa más de un 3% de sólidos se obtienen los siguientes valores:

$$Q_1 = Q \text{ lodos en seco} = 12,50 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{100 \text{ kg corriente}}{3 \text{ kg se sólidos}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ kg}} = 0,416 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_1 = Q \text{ lodos en seco} = 10,006 \text{ m}^3/\text{d}$$



Obtenido este valor se realiza el cálculo del caudal que sale del espesador, teniendo en cuenta que en este caso no puede coger más de un 10% de sólidos. Se calcula también la densidad de la mezcla al 11,98 % en peso de granito y lo restante de agua, que se obtiene un valor de 1215,64 kg/m<sup>3</sup>.

$$Q_2 = 12,50 \frac{kg}{h} \times \frac{100 kg corriente}{10 kg se sólidos} \times \frac{1 m^3}{1215,64 kg} = 0,1028 m^3/h$$

$$Q_2 = Q \text{ lodos en seco (espesador)} = 2,46 m^3/d$$

Y el caudal de recirculación se obtiene de la diferencia del Q1 con el Q2.

$$Q_{recirculación} = Q_1 - Q_2 = 10,006 \frac{m^3}{d} - 2,46 \frac{m^3}{d} = 7,53 \frac{m^3}{d}$$

Por ello una vez obtenidos los datos se introducen en el GPS-X. Como se puede observar en las siguientes imágenes. Botón derecho en el sedimentador, “parámetros de entrada” y se introducen tanto datos físicos como operacionales.



Section	Parameter	Value	Unit
High-Rate Treatment Model	[exitlimpia] equation shape	Constant TSS Removal Efficiency	-
	[exitlimpia] maximum settleable solids fraction	0.8579	-
	[exitlimpia] exponential constant for TSS dependence	81.55	mg/L
	[exitlimpia] surface overflow rate at half the maximum ...	2232.0	m/d
Operational Parameters	[exitlimpia] underflow setup	Underflow Rate	-
	[lodoespesado] tasa de recirculación	10.006	m3/d
	[lodoespesado] underflow concentration	20000.0	mg/L
Makeup Microsand	[exitlimpia] makeup sand	flow based	-
	[exitlimpia] makeup sand required per unit flow treated	0.0	mg/L

Ilustración 36. GPS-X. Dato: Sedimentador.

A continuación, se introducen los datos físicos, que tratarán de ser lo más parecidos a la realidad, aunque posteriormente se optimizará el sistema y posiblemente cambien las dimensiones. Se introducen una superficie de  $200 \text{ m}^2$ , una temperatura a valorar por el programa y únicamente estará en funcionamiento un tren del sedimentador.

Parameter	Value	Unit
[exitlimpia] number of trains in operation	1.0	-
[exitlimpia] surface area of one train	200.0	m2
[exitlimpia] use local temperature	Encen...	-
[exitlimpia] local liquid temperature	20.0	C

Ilustración 37. GPS-X. Dato: Fisico Sedimentador.



Para terminar, se introducen los datos de entrada al espesador y al deshidratador. Dichos datos se han calculado anteriormente, con el fin de que funcione el sistema de la mejor manera posible. Del espesador y posteriormente del deshidratador saldrán los fangos tratados que serán vertidos o tratados por otra empresa. Y al sistema se recirculará parte del agua obtenida para así perder el menor número de litros de agua y que la salida de agua limpia contenga los mismos metros cúbicos por hora que a la salida de la planta de tratamiento.

Flujo bombeado en el espesador:

Parameter	Value	Units
[24] specify solids removal by setting...	removal efficiency (conc.) and un...	
[deshientr] flujo bombeado	2.46	m3/d
[deshientr] underflow solids	48000.0	mg/L
[24] removal efficiency (concentration basis)	0.9	-

Ilustración 38. GPS-X. Dato: Operacional espesador.

Los datos que no se han introducido, los calculará el programa, y una vez obtenidos se optimizarán hasta llegar a los resultados de agua limpia que se desean obtener, para poder cumplir con la legislación y así poder recircular el agua a la planta de tratamiento de granito. Posteriormente, una vez terminada la parte de modelación (pantalla en la que se crea el sistema de tratamiento de aguas residuales), se deberá pasar a la pestaña de simulación, en la cual se obtendrán los parámetros de entrada y de salida de cada uno de los equipos. Habrá que ir observando todos los datos, pero principalmente los datos obtenidos en la salida del agua limpia.

A continuación, se mostrarán y comentarán los valores que se obtienen al realizar la simulación del esquema principal modificado.



Simulación mediante GPS-X del proceso de acondicionamiento de aguas residuales procedentes de actividades mineras para su reutilización en el propio sistema.

---





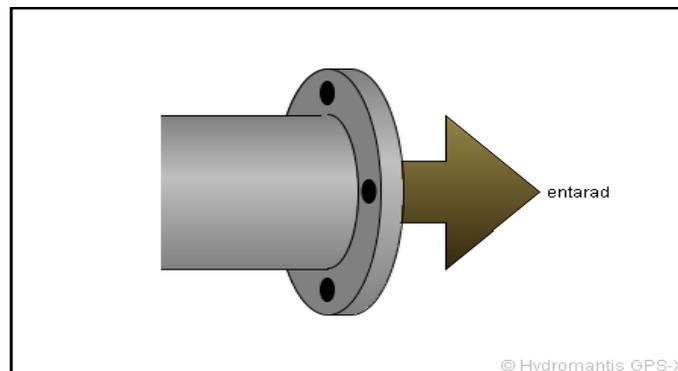
## 7.5. Obtención de datos

Con el esquema ya fijado en la parte de modelización del programa, se pasará a la parte de simulación, en la cual nos dará los datos de los parámetros a las salidas de agua limpia y lodos, como antes y después de cada equipo seleccionado. Por lo tanto, observando dichos datos, en cada equipo, se podrá hacer una comparativa muy visual, así como saber que compuesto elimina cada equipo.

Una vez realizada esta comparativa, y teniendo los resultados finales de agua limpia a recircular en la planta de tratamiento de granito, se optimizará el sistema para que los equipos obtengan los resultados deseados con el menor tamaño posible y se añadirán o eliminarán equipos en caso de ser necesario.

Se comienza observando los datos que posee el influente cuando entra en el sistema de tratamiento de aguas residuales creado en el GPS-X.

### 7.5.1. Datos entrada agua



*Ilustración 39. Símbolo influente GPS-X.*



RESULTADOS SIMULACIÓN		INFLUENTE
Parámetros	Unidades	Valor
Flujo	m <sup>3</sup> /d	6000
SST	mg/L	87,2
VSS	mg/L	69,7
DBO <sub>5</sub>	mg/L	59,8
DQO	mg/L	180
TN	mgN/L	40
TP	mgP/L	10
<i>Total Alkalinity</i>	mgCaCO <sub>3</sub> /L	352,4
pH	-	7,9

Tabla 14. Datos de entrada del influente al GPS-X

Como se puede observar el flujo es el que se ha añadido al programa 250 m<sup>3</sup> /h, y el otro valor introducido es el de la DQO, 180 mg/L. Los demás datos que aparecen en la tabla han sido calculados por el propio programa, al introducirle que se tratará de un modelo “codstates” y añadir la librería “comprehensive”.

Al observar lo valores, es claramente apreciable que hay que tratar el agua, ya que los valores de DQO, DBO<sub>5</sub>, SST, pH, etc. no están dentro de los parámetros exigidos por la ley para la reutilización del agua.

Como se comentó con anterioridad los sólidos suspendidos totales (SST), deberán tener un valor que no supere los 35 mg/l, la DQO, deberá tener un valor inferior a los 150 mg/l, la DBO<sub>5</sub> no deberá superar los 25 mg/l y el pH se deberá mantener entre 6 y 7,5. Por lo tanto, el fin de este tratamiento de aguas será que los valores a la salida de agua limpia estén dentro de los parámetros mencionados, con los mínimos recursos posibles, para su recirculación en la planta de tratamiento de granito.



### 7.5.2. Datos sedimentador:

En este caso se realizará una tabla con los datos de entrada del sedimentador y los datos de salida. Con esta comparativa se podrá observar de manera numérica el trabajo que ha realizado el sedimentador. Además, observando los datos del influente y los datos de entrada al sedimentador, se tiene el trabajo realizado por el desarenador y por el tanque de coagulación.

El sedimentador utilizado en el esquema será un sedimentador "high-rate", comúnmente conocido como sedimentador de alta tasa. Los sedimentadores de alta tasa son aparatos de sedimentación gravitacional que tienen períodos de retención de no más de 15 minutos y una eficiencia comparable a los tanques de sedimentación rectangulares convencionales, con períodos de retención de por lo general más de dos horas. (academica, 1995, pág. 78)

Como se ha explicado con anterioridad, el floculante será añadido dentro del sedimentador, ya que el programa no da la opción a añadir un tanque de floculación.

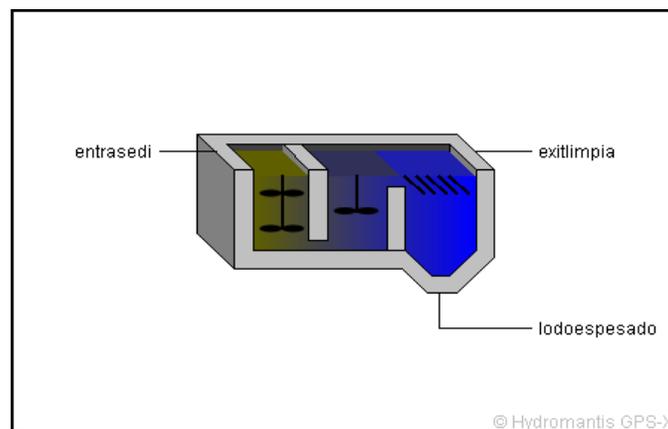


Ilustración 40. Símbolo sedimentador "high-rate" GPS-X.



RESULTADOS SIMULACIÓN		ENTRADA Sedimentador	SALIDA Sedimentador
Parámetros	Unidades	Valor	Valor
Flujo	m <sup>3</sup> /d	6139,77	5989,77
SST	mg/L	79,83	11,34
DQO	mg/L	188,11	89,03
Total Alkalinity	mgCaCO <sub>3</sub> /L	282,16	287,28
pH	-	7	7

Tabla 15. Datos entrada y salida sedimentador GPS-X.

Que el valor de entrada de flujo en el sedimentador (6139,77m<sup>3</sup>/d) sea mayor que el de la entrada del influente, se debe a que antes del sedimentador existe una recirculación del agua extraída en el equipo de deshidratación, de manera más visual se mostrará después en los diagramas de Sankey que se obtienen en el programa.

En cuanto a los sólidos suspendidos totales, varían de una entrada de 79,8 mg/l a una salida de 11,34 mg/l, por lo tanto, habrá que optimizar este equipo, ya que el valor máximo de SST debe ser de 35 mg/l. Y el sedimentador es posible que esté sobredimensionado y que con menos superficie se obtenga un valor de SST que sea admitido por la legislación. El desarenador también ha retirado parte de SST, ya que el valor de entrada era de 87, 2 mg/l y el de entrada al sedimentador de 79,8 mg/l, por lo que se obtiene que el desarenador elimina 7,4 mg/l de SST. Lo que supone aproximadamente 44,4 kg/d de SST eliminados en el desarenador y también 410,76 kg/d de SST, eliminados en el sedimentador.

La DQO, demanda química de oxígeno, también varía en el sedimentador de 188,10 mg/l a 89,03 mg/l, por lo que estará dentro de los parámetros admitidos por la ley. Posiblemente, como se optimizará la superficie del sedimentador respecto a los SST, también se tendrá margen hasta llegar a 150 mg/l de DQO, máximo permitido por la ley.



La alcalinidad, ha aumentado debido a la adición del coagulante y el floculante. Los valores que se tienen de la alcalinidad demuestran que una vez salida el agua limpia de este sistema se le deberá aplicar un tratamiento para disminuir dichos valores de alcalinidad ( $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ ).

Por último, el pH que de entrada poseía un valor de 7,9, una pasado la etapa de desarenación, el tanque de coagulación y el sedimentador, el valor del pH, estará en 7, por lo tanto, ese valor estará dentro de lo permitido (6-7,5). Y lo que esto supone es que no se deba realizar un tratamiento adicional para disminuir o aumentar el pH.

Otra manera que da el programa de observar si el sedimentador está trabajando de manera óptima, es la obtención de un gráfico de barras horizontal, que se obtiene el valor de la salida de SST y de la DQO, en función de cada capa y se divide el sedimentador en 10 capas. Lo que se puede obtener de este valor es que si debido a un fallo, la bomba en vez de coger agua de la primera capa coge de la segunda el valor de salida sea el mismo o que sea menor al límite establecido.

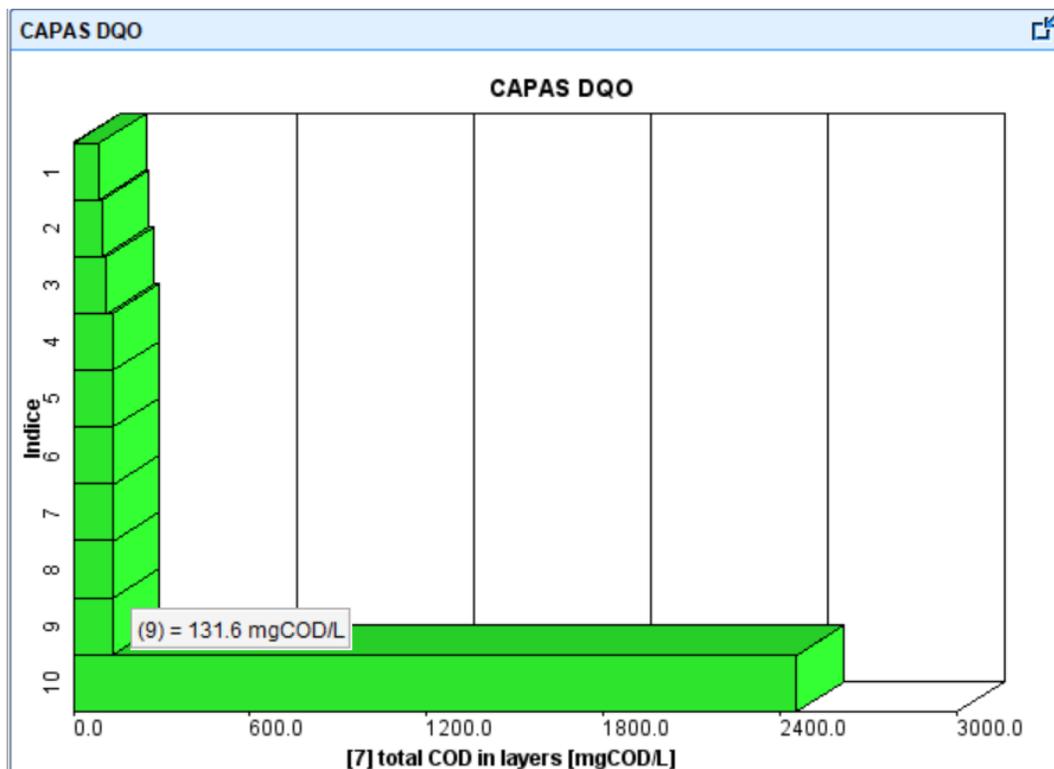


Ilustración 41. DQO en función de las capas del sedimentador.



En la captura de imagen anterior realizada en el programa, se observa que en las 9 primeras capas el límite de la DQO será válido, por lo tanto, si debido a un fallo la bomba cogiese agua de la capa 3, seguiría valiendo esa agua limpia. No se puede apreciar lo mismo en la capa 10, ya que tiene un valor muy alto, con respecto a las anteriores capas. Lo ideal en este tipo de gráficos es que el 30 % inicial del sedimentador trabaje libre de sólidos y luego aumente la DQO de manera gradual.

Por lo tanto, habría que conseguir que la última capa no tuviese tanta concentración de DQO y que lo repartiese en las capas 9, 8 y 7. Esta alta concentración se debe a que quizás se haya añadido más coagulante y floculante del que se debe. Se estudiará la optimización de la cantidad de coagulante y floculante añadido.

Además de las capas del sedimentador en función de la DQO, se puede obtener la gráfica en función de los sólidos suspendidos totales o de cualquier otro parámetro que se susceptible de estudio.

En la siguiente imagen, se vuelve a mostrar un gráfico de barras horizontal, obtenido en una simulación, del sistema creado en GPS-X. En este caso, se han obtenido los resultados de los sólidos suspendidos totales, en las 10 capas en las que se divide el sedimentador. Como se observa en la imagen, las capas van aumentando su concentración de SST progresivamente hasta llegar a la última capa que aumenta de manera desmesurada. Hay que conseguir es que ese aumento fuese progresivo y en vez de tener una concentración de SST excesivamente grande en la capa número 10, se repartiese ese valor en las anteriores capas. Ya que, en caso de fallo en la bomba de extracción de lodos del sedimentador, extrae algo más de 1/10, se está malgastando agua, ya que coge agua con una concentración de lodos muy baja.

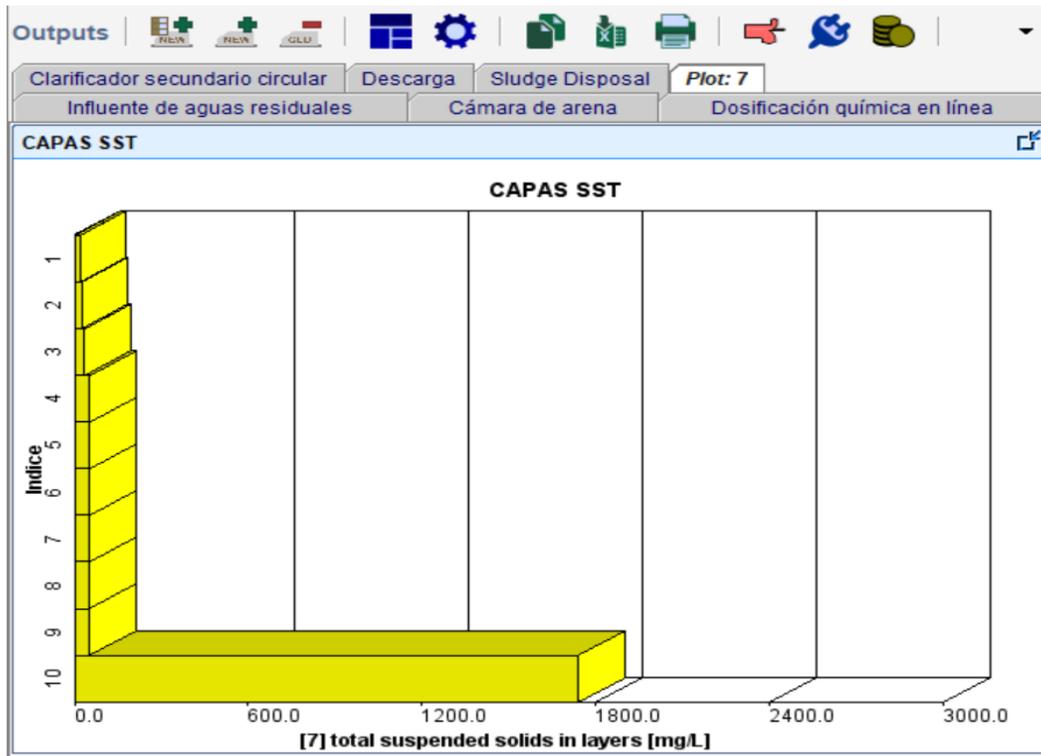


Ilustración 42. SST en función de las capas del sedimentador.

Posteriormente se optimizará el sistema para que esos valores obtenidos sean óptimos y la planta de tratamiento de aguas residuales pueda trabajar con un rendimiento mayor, sin tener fallos.



### 7.5.3. Datos salida lodos:

Una vez que salen los lodos, por la parte inferior del sedimentador, se les realizará un tratamiento de lodos, con el fin de obtener los lodos lo más secos posible y así poder recuperar el agua que poseen y recircularla en el sistema. Dicho tratamiento estará formado por un espesador de lodos y posteriormente una etapa de deshidratación de los lodos.



Ilustración 43. Símbolo salida lodos GPS-X.

A continuación, se muestran los valores obtenidos en la salida de lodos:

RESULTADOS SIMULACIÓN		SALIDA Lodos
Parámetros	Unidades	Valor
Flujo	m <sup>3</sup> /d	10,23
SST	mg/L	36900
VSS	mg/L	34690
DBO <sub>5</sub>	mg/L	8643
DQO	mg/L	53440
TN	mgN/L	6106
TP	mgP/L	935,8
Total Alkalinity	mgCaCO <sub>3</sub> /L	287,3
pH	-	7

Tabla 16. Datos salida lodos GPS-X.



Como se puede observar en la tabla, los valores obtenidos son altísimos, ya que en los lodos se concentran todas las partículas de entrada que existían en el agua y que se han retirado para obtener agua limpia, además dichos lodos contienen muy poca cantidad de agua,  $10,23 \text{ m}^3/\text{d}$ , por lo que dichos lodos serán muy secos.

Una vez obtenidos los lodos secos se deberá seleccionar el tratamiento final de dichos lodos, entre los que están los siguientes:

- **Deposito en vertedero:** Es preciso determinar si es peligroso o no. Se utiliza si no hay otra alternativa.
- **Aprovechamiento agrícola:** Compost o abono orgánico. En el caso de poseer materia orgánica .
- **Incineración:** Reducción térmica. Reduce mucho el volumen, pero puede generar altos costes y problemas medioambientales.

#### 7.5.4. Datos salida agua limpia

Una vez observados todos los datos de entrada y salida de los equipos, se deben observar los datos de salida del agua limpia, estos datos servirán para decir si este tratamiento es correcto o si se debe cambiar algún equipo.

Después de que el agua haya pasado por todos los equipos, por la parte alta del sedimentador, lugar donde el agua estará más limpia, se añade una tubería que mediante una bomba transportará el agua limpia a la planta de tratamiento de granito. Antes de transportar dicha agua habrá que asegurarse que los valores obtenidos están dentro de la legislación vigente.



Por lo tanto, a continuación, se mostrarán los datos a la salida del agua limpia del sistema de tratamiento.

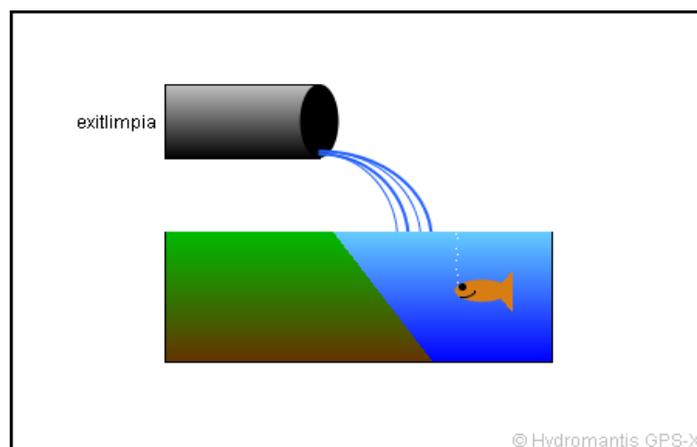


Ilustración 44. Símbolo salida agua limpia GPS-X.

RESULTADOS SIMULACIÓN		SALIDA AGUA LIMPIA
Parámetros	Unidades	Valor
Flujo	m <sup>3</sup> /d	5989,77
SST	mg/L	11,34
VSS	mg/L	10,6
DBO <sub>5</sub>	mg/L	45,1
DQO	mg/L	89,03
TN	mgN/L	29,6
TP	mgP/L	8,4
Total Alkalinity	mgCaCO <sub>3</sub> /L	280
pH	-	7

Tabla 17. Datos salida agua limpia GPS-X.



Con estos resultados finales se pueden sacar las siguientes conclusiones del esquema:

- El flujo de salida es de 5989,77 m<sup>3</sup>/d y como se debe llegar a 6000 m<sup>3</sup>/d entrada en la planta de tratamiento de granito, se podrá realizar añadiendo esos 10,23 m<sup>3</sup>/d que le faltan al sistema de agua limpia, u optimizando el tratamiento de lodos para recircular toda el agua. Esta segunda idea será peor económicamente ya que habrá que poseer equipos de gran rendimiento.
- Los SST se sitúan en 11,34 mg/l, por lo que se puede optimizar el área del sedimentador, y ajustar más los valores con el fin de hacer más económica la planta.
- La DBO<sub>5</sub>, no se ha reducido hasta el valor máximo de 25 mg/l, por lo que habrá que optimizar la planta y ver que parámetro puede cambiar para que dicho valor disminuya. En caso de no disminuir, se debería añadir otro equipo que elimine la demanda biológica de oxígeno, como podría ser el caso de un filtro de arenas. En este caso, al añadir otro equipo se deberá volver a simular el sistema y observar los resultados finales. Hay que reducir la DBO<sub>5</sub>, hasta un valor de 25 mg/l.
- La DQO, demanda química de oxígeno, estará por debajo del valor que se exige. Por lo tanto, no habrá que modificar nada. Al optimizar el área del sedimentador para cambiar el valor de los SST, posiblemente variará también el valor de la DQO.
- Antes de recircular el agua se deberá realizar un tratamiento para disminuir la alcalinidad del agua limpia.
- El pH, con un valor de 7, no necesitará ningún tipo de tratamiento adicional.



### 7.5.5. Diagramas de SANKEY:

El diagrama de Sankey es un tipo específico de diagrama de flujo, en el que la anchura de las flechas se muestra proporcional a la cantidad de flujo. Los diagramas de Sankey que proporciona el programa GPS-X, son diagramas muy intuitivos, los cuales disponen de códigos de color, mezcla grosores e intensidades, para hacerlo más visual.

Al poseer un sistema complejo, con varias recirculaciones, este diagrama servirá para ver de manera visual si dicho sistema está funcionando de manera correcta y óptima. Se estudiarán las principales variables del sistema, como son flujo, DQO y SST. También tiene una función de observar el contenido en fósforo y en nitrógeno, pero no influyen este sistema dichos compuestos.

La función de obtener el diagrama de Sankey en el programa, se sitúa en la parte superior derecha en la pantalla de simulación.

- **Flujo:**

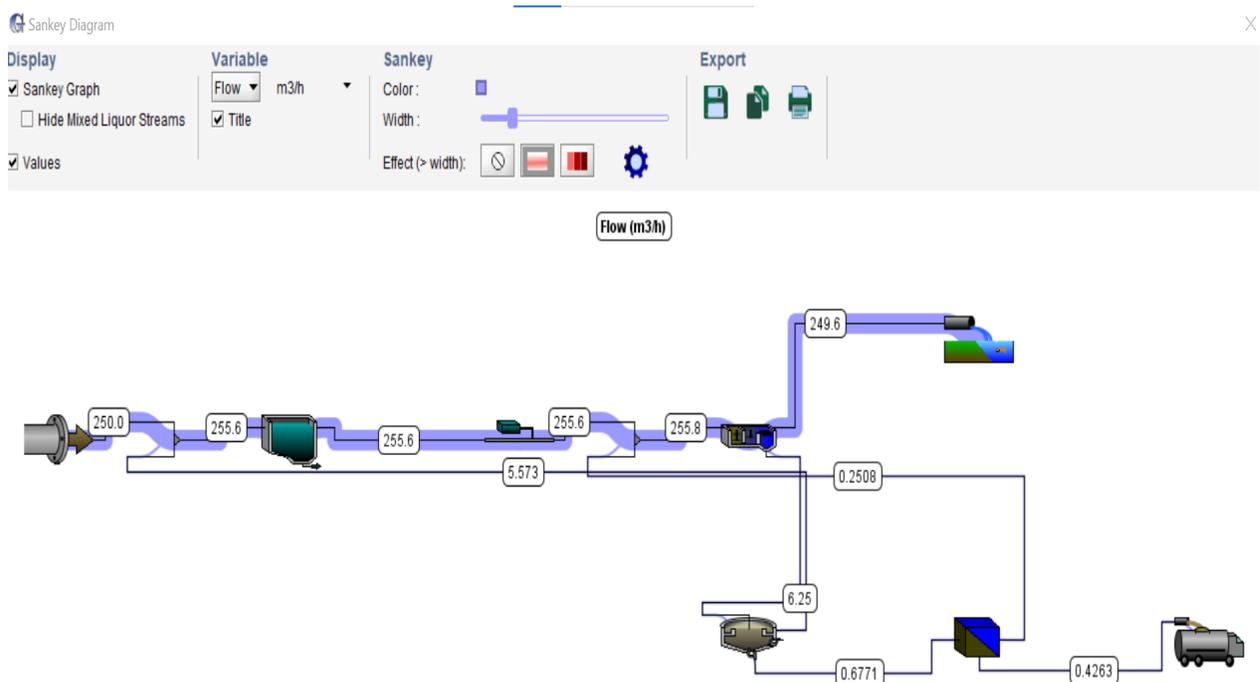


Ilustración 45. Diagrama Sankey flujo.



Como se observa en la imagen anterior, la mayor parte del flujo pasa por la etapa de pretratamiento, posteriormente por la etapa de tratamiento primario, y finalmente por la salida de agua limpia.

Se ha conseguido que la mayor parte del agua se recircule (99.8%) y que se pierda 0,4263 m<sup>3</sup>/h de agua en los lodos, esto quiere decir que en referencia al flujo de agua el sistema se ha creado de manera óptima, y no necesitaría cambios.

- **DQO**

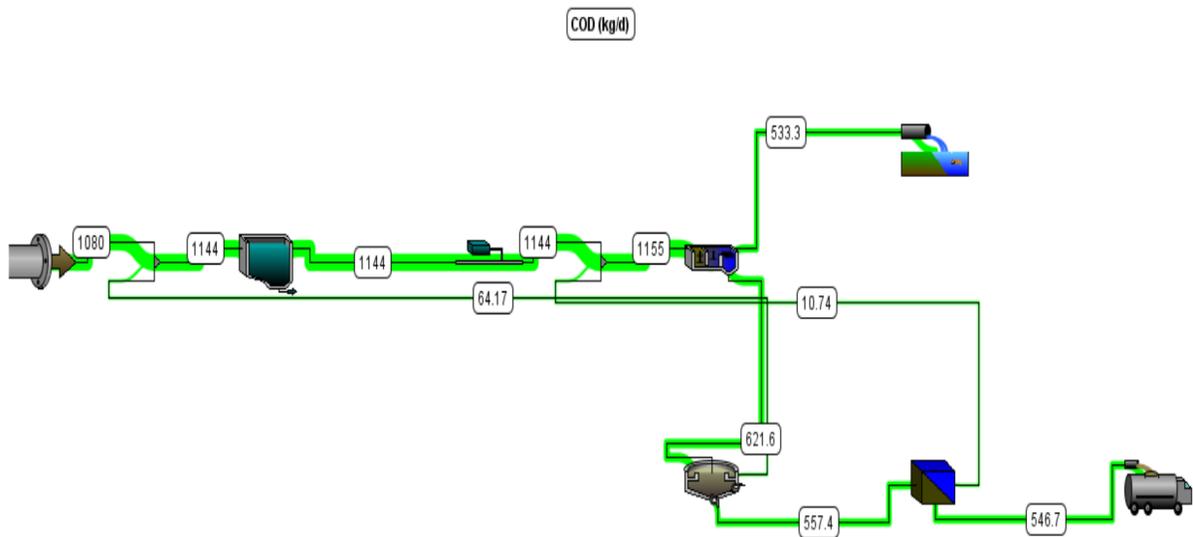


Ilustración 46. Diagrama Sankey DQO.

Con respecto al diagrama de Sankey de flujo, que las unidades eran m<sup>3</sup>/h, en este caso las unidades serán de kg/d. De manera que se verá fácilmente la cantidad de DQO que existe en cada etapa.



A la entrada del sistema, entran 1080 kg/d de DQO (demanda química de oxígeno), que como se ha comentado con anterioridad habrá que reducirla hasta que el valor de salida este dentro de los parámetros exigidos.

En la etapa de pretratamiento y tratamiento primario, tiene una cantidad de 1144 kg/d, lo cual habrá que eliminar y que la mayor parte de esa DQO se vaya al tratamiento de lodos. Comparando las salidas de agua y de lodos, los valores son 533,3 kg/d y 546,7 kg/d respectivamente. La cantidad de kg/d que salen por un lugar u otro es similar, pero la diferencia que existe entre ambos es que en la salida de agua estarán diluidos en esos 5990,4 m<sup>3</sup>/d, por lo tanto, la concentración será mínima. Y en el caso contrario a la salida de los lodos, la concentración de DQO, será máxima.

- **Sólidos suspendidos totales**

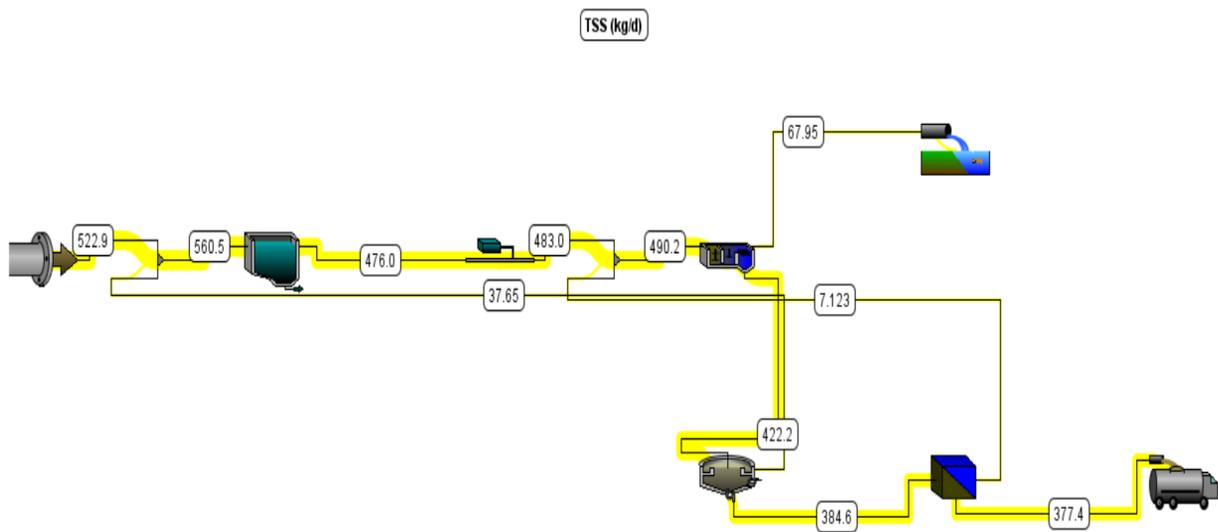


Ilustración 47. Diagrama Sankey SST.



En el sistema entran 522.9 kg/d, que como se observa en el diagrama el 75% de ellos, saldrán por la salida de lodos. Uno de los principales objetivos de la realización de este trabajo es obtener un agua con una cantidad de sólidos suspendidos menor a 35 mg/l. y en este caso se obtienen 67,95 kg/d en la salida de agua limpia, lo que representa 11,35 mg/l, valor que está dentro de los parámetros adecuados.

En la imagen se puede observar como el desarenador realiza su función, eliminando las partículas de mayor tamaño, ya que de 560 kg/d que tiene a la entrada, es capaz de retirar sólidos hasta llegar a 476 kg/d. Con la adición de coagulante y floculante, las partículas que entren al sedimentador caerán al fondo de este dónde se retirarán y se transportarán a los lodos. Se puede llegar a la conclusión de para eliminar sólidos suspendidos en equipo que mejor funciona será el sedimentador “high-rate” ya que elimina el 85% de sólidos existentes cada día. Es posible que elimine más sólidos de la cuenta, por lo que se tratará de optimizar dicho sedimentador con el fin de ajustar el dato a 30 mg/l de SST a la salida de agua limpia.



## 7.6. Optimización del esquema

Observando los datos obtenidos en los puntos anteriores y teniendo en cuenta que el sistema se ha creado para la eliminación de partículas de granito, se comenzará la optimización de la planta en base a los sólidos.

Existen algunos valores de salida como la DQO o los sólidos suspendidos que están dentro de los valores que exige la ley para la recirculación, pero optimizando la planta se consiguen valores más ajustados y se abarataría el coste de esta, ya que se llegaría al resultado deseado, pero con menos recursos.

En el caso de la DBO<sub>5</sub>, se deberá observar si una vez optimizados los parámetros en función a los sólidos, disminuye y el valor a la salida del agua limpia baja de 45,1 mg/l. En caso de que este valor siga estando por encima del límite máximo, se estudiará un posible cambio en el esquema, añadiendo un equipo que mejore la demanda biológica de oxígeno.

A continuación, se mostrará paso por paso como se realiza la optimización de un parámetro final, optimizando un valor de un equipo del sistema. En este caso, se optimizará la superficie del sedimentador (posiblemente sería excesiva la calculada anteriormente) en función de obtener 30 mg/l de SST a la salida del agua limpia, valor que se está dentro del límite.

Situándose en la pantalla de modelización del programa, habrá que seleccionar el icono marcado en rojo en la siguiente imagen y seleccionar el modo optimizar.

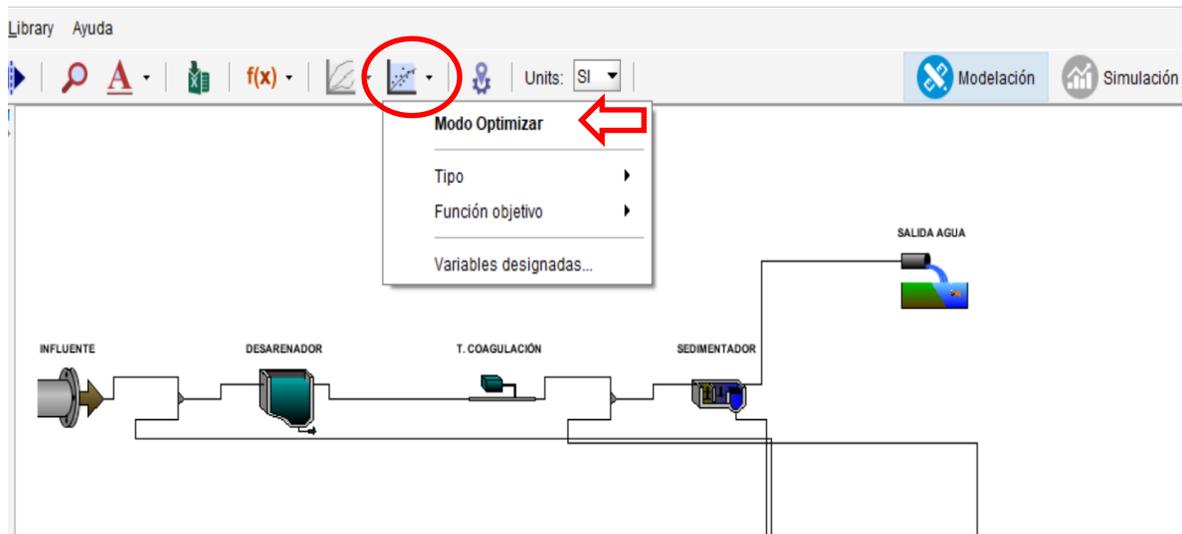


Ilustración 48. Pantalla modelización (modo optimizar)

Una vez seleccionado dicho modo se abrirá la pestaña que sale a continuación en la que se deberá seleccionar primero el parámetro de salida que se quiere obtener. Después, en el punto 2, se seleccionará el parámetro que se debe optimizar, en este caso la superficie del sedimentador.

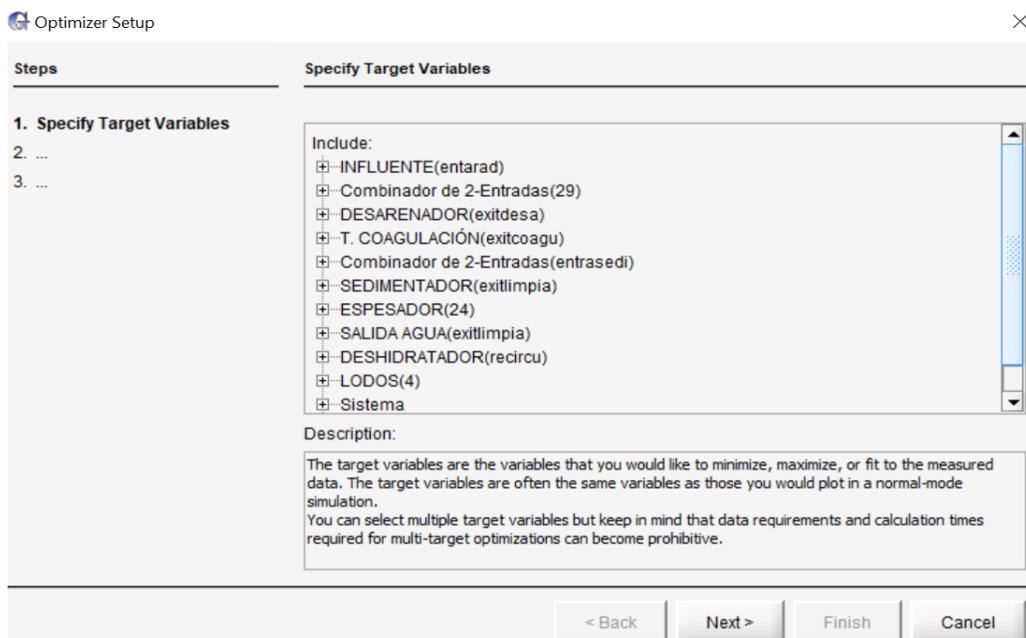


Ilustración 49. GPS-X, pantalla del Modo optimizar.



Por último, en el apartado “Target Comparasion” se pueden elegir diferentes tipos de optimización, en función de un valor, aplicando para que optimice al máximo o al mínimo. En este caso como se ve en la siguiente imagen, se optimizará en función a un valor, que será 30 mg/l.

Specify Optimizer Settings			
Target Comparison	Fit to Value	Add Data File...	30.0
Tipo	Series de tiempo		
Función objetivo	Diferencia absoluta		
Simulation Stop Time	1.0	d	

*Ilustración 50. Dato introducido en el GPS-X, pantalla del Modo optimizar.*

Se le da al botón de finalizar, e inmediatamente te lleva el programa a la pantalla de simulación donde al darle al play, irá realizando la optimización de la superficie del sedimentador hasta obtener un valor de superficie con el que la salida del agua limpia sea de 30 mg/l de SST.

A continuación, se muestra la gráfica obtenida en esta optimización y el valor óptimo de superficie con el que debería trabajar el sedimentador.

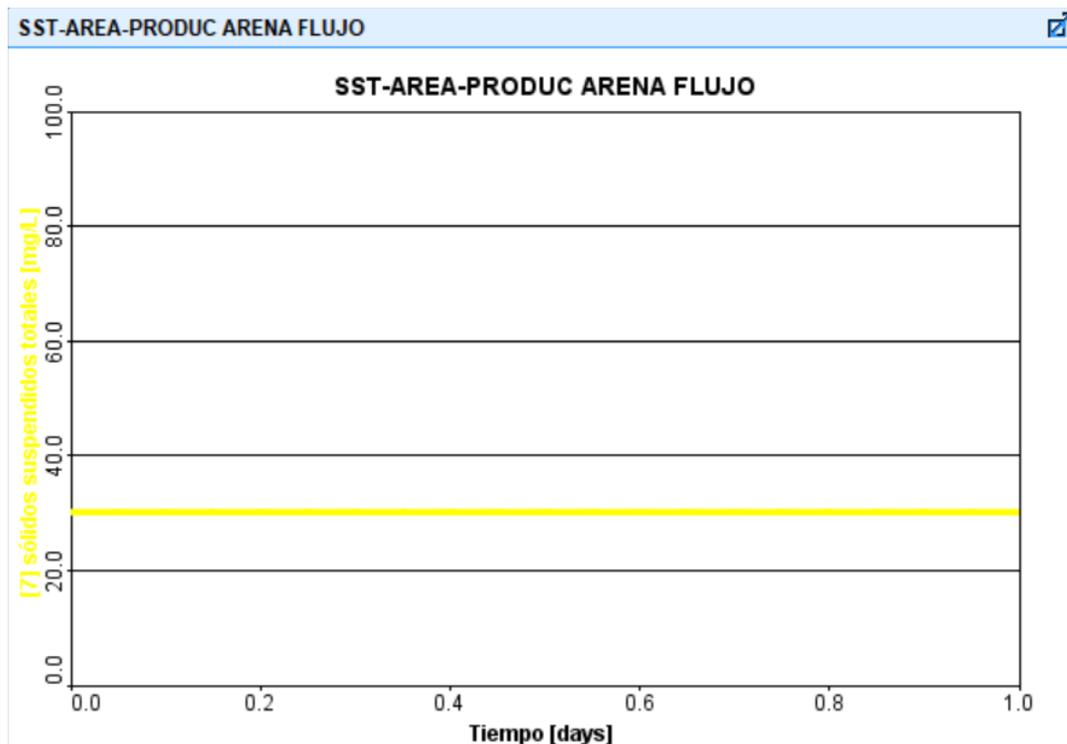


Ilustración 51. Optimización del área del sedimentador en función de los SST

En la optimización también se ha añadido como valor a optimizar la cantidad de producción de arena por flujo que se crea en el desarenador, ya que este equipo es posible que produjese menos arena por flujo de lo que debería.

La optimización ha finalizado, una vez que el valor de los sólidos suspendidos totales llega a 30 mg/l, como se puede observar en la imagen anterior. Y una vez finalizada se deberá observar los valores tanto de superficie como de producción de arena por flujo que se han obtenido.

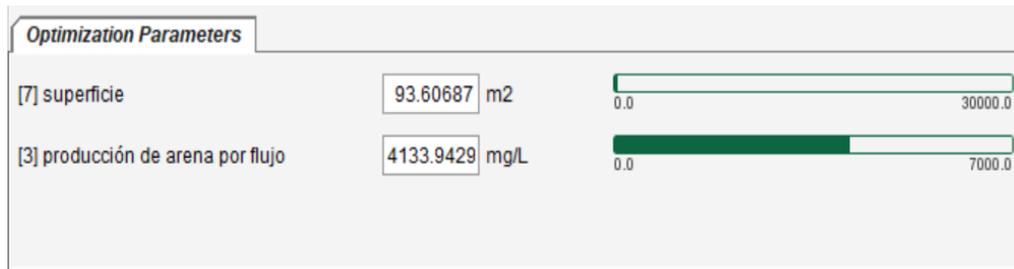


Ilustración 52. Valores optimización de la superficie obtenidos

Como se puede ver en la anterior imagen, la superficie adecuada del sedimentador para que la salida de agua limpia contenga, 30 mg/l de SST será de 93,6 m<sup>2</sup>, por lo que dicha superficie pasará de los 200 m<sup>2</sup> iniciales a 93, 6 m<sup>2</sup>.

Por otro lado, para que el valor final pueda salir 30 mg/l y la superficie del sedimentador se de 93, 6 m<sup>2</sup>, se deberá aumentar la producción de arena por flujo hasta los 4133,94 mg/l (valor inicial 3500mg/l).

Sabiendo estos nuevos valores se seguirán realizando optimizaciones, con el fin de optimizar el mayor número de parámetros posibles y posteriormente se volverá a realizar una simulación del programa para comprobar que los valores de salida de agua limpia estén dentro de los parámetros exigidos por la ley.

Después, de optimizar la superficie del sedimentador en función de los sólidos, se debe realizar la optimización del mismo parámetro en función de la DQO, ya que es posible que el valor de la superficie que se obtenga sea mayor y con 93, 6 m<sup>2</sup>, no valga para cumplir con los datos de SST y DQO. Para ello se repiten los pasos anteriores, pero en este caso se debe seleccionar la DQO como objetivo de salida y darle un valor de 110 mg/l, para no acercarse demasiado al límite.



Target Comparison: Fit to Value (Add Data File... 110.0)

Tipo: Series de tiempo

Función objetivo: Diferencia absoluta

Simulation Stop Time: 1.0 d

Description:  
Settings to specify how the optimizer behaves. Options include minimizing or maximizing a variable, or fitting a variable to time-series data. If fitting to data, make sure the simulation stopping time is at least as long as the time-series dataset.

Ilustración 53. Dato GPS-X introducido en el Modo optimizar

Una vez introducido el dato final, el programa simulará solo una gráfica hasta que el valor de la DQO llegue a 110 mg/l, para ello va haciendo reducciones o aumentos de la superficie.

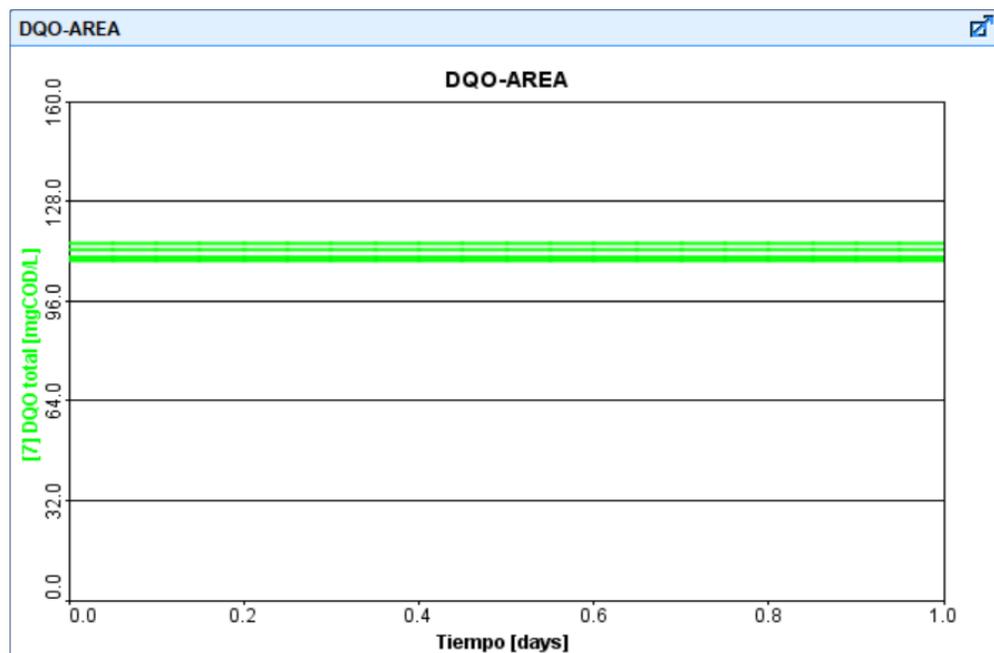
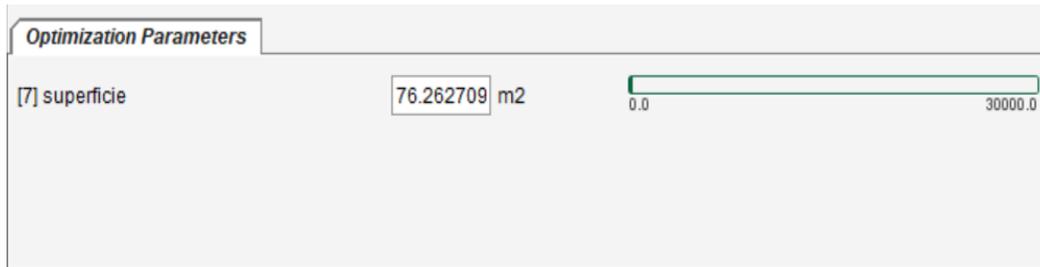


Ilustración 54. Optimización del área del sedimentador en función de la DQO



Terminada la simulación, con el valor de 110 mg/l de DQO final, se obtiene el siguiente valor de superficie del sedimentador



*Ilustración 55. Valores de la optimización obtenidos*

El dato de la superficie que se obtiene es de 76,26  $m^2$ , valor más pequeño que el obtenido en la anterior optimización. Con este valor asegurarías tener un valor de DQO óptimo, pero el valor de los SST incrementa debido a que tiene menor superficie el sedimentador, por lo que se quedaría fuera de los límites exigidos.

En definitiva, se sigue manteniendo en valor de superficie anterior, de 93, 6  $m^2$ , ya que con este valor se asegura el correcto funcionamiento de la planta y unos valores de salida óptimos tanto en sólidos suspendidos como en la demanda química de oxígeno.

Realizadas estas dos optimizaciones se realiza la optimización del área del sedimentador en función de la DBO<sub>5</sub>. Debido a que este valor estaba fuera de los límites, es posible que el área del sedimentador deba de ser mayor.

Se repite el paso de optimización y se le da un valor máximo a la DBO<sub>5</sub>, de 23 mg/l, como se observa en la siguiente imagen.



**Specify Optimizer Settings**

Target Comparison: Fit to Value (dropdown), Add Data File... (button), 23.0 (text box)

Tipo: Series de tiempo (dropdown)

Función objetivo: Diferencia absoluta (dropdown)

Simulation Stop Time: 1.0 d (text box)

Description:

Ilustración 56. Dato DBO5, GPS-X Modo optimizar

Una vez simulado se obtiene la siguiente gráfica:

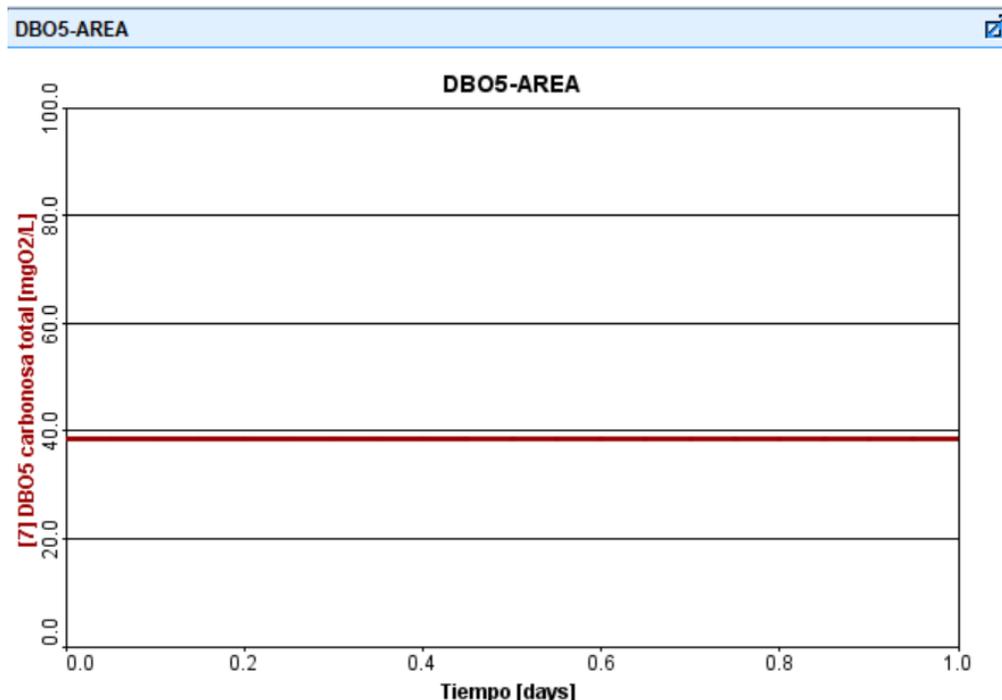
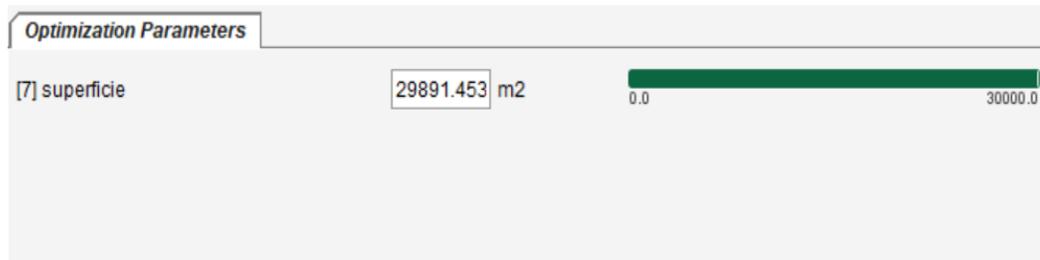


Ilustración 57. Optimización del área del sedimentador en función de la BBO5 final



En la gráfica anterior se observa que el valor de la DBO<sub>5</sub> no llega al valor deseado de 23 mg/l, eso quiere decir que se ha quedado sin superficie a optimizar. En la siguiente imagen se ve como la superficie a la que ha llegado es de casi 30000 m<sup>2</sup> un valor muy por encima de cualquier posibilidad de construcción. Por lo que, se dejará una superficie de 93,6 m<sup>2</sup> del sedimentador y se estudiará la posibilidad de añadir otro equipo al sistema que haga que disminuya la DBO<sub>5</sub>.



*Ilustración 58. Valores optimización.*

Con la nueva superficie el sedimentador, y cambiado la producción de arena por flujo del desarenador, esto hará que la planta de tratamiento de agua residuales procedentes de la planta de granito trabaje de manera óptima y con mayor rendimiento.

Para comprobar esto, se han vuelto a realizar las gráficas de barras obtenidas anteriormente en el sedimentador, para ver si con la nueva superficie los sólidos en suspensión y la DQO, se divide de mejor manera en capas.

Como se observa en la siguiente imagen, el problema que se comentaba con anterioridad ha mejorado, ya que la distribución en las capas es más paulatina tanto en la gráfica amarilla como en la verde. Esto quiere decir que si una bomba falla y bombea más de la cuenta el sistema no sufrirá cambios bruscos ni trabajará por encima de sus posibilidades. Por la parte superior de las gráficas, el agua seguiría estando dentro de los parámetros establecidos y por la parte inferior no se acumularía todo en una capa.

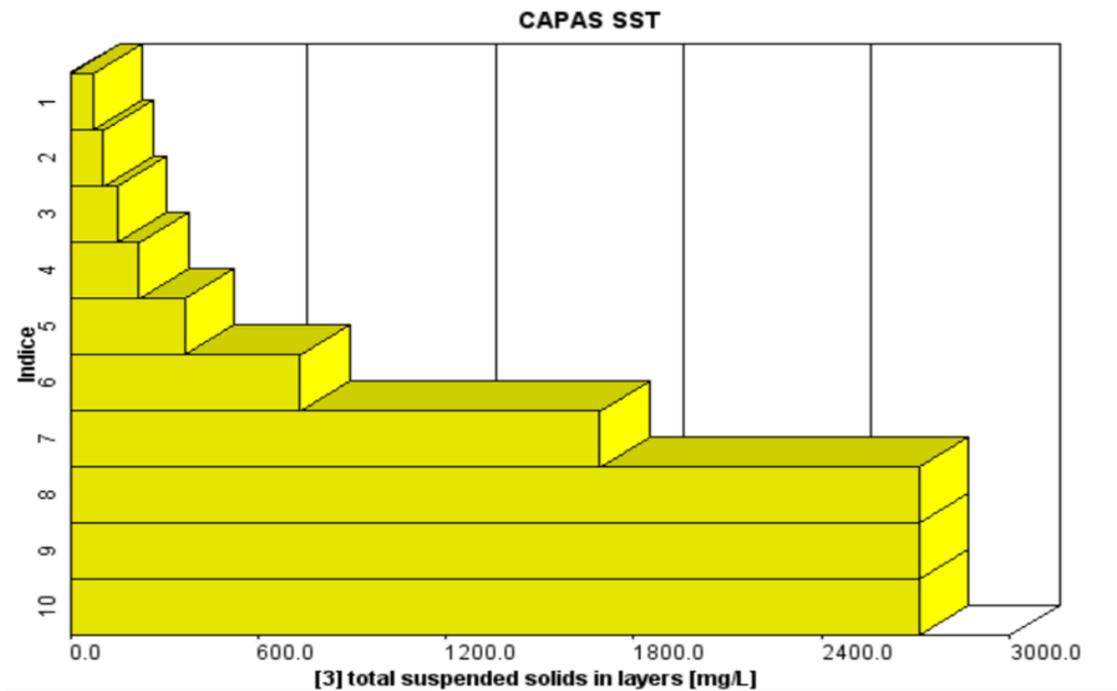


Ilustración 59. SST en función de las capas del sedimentador.

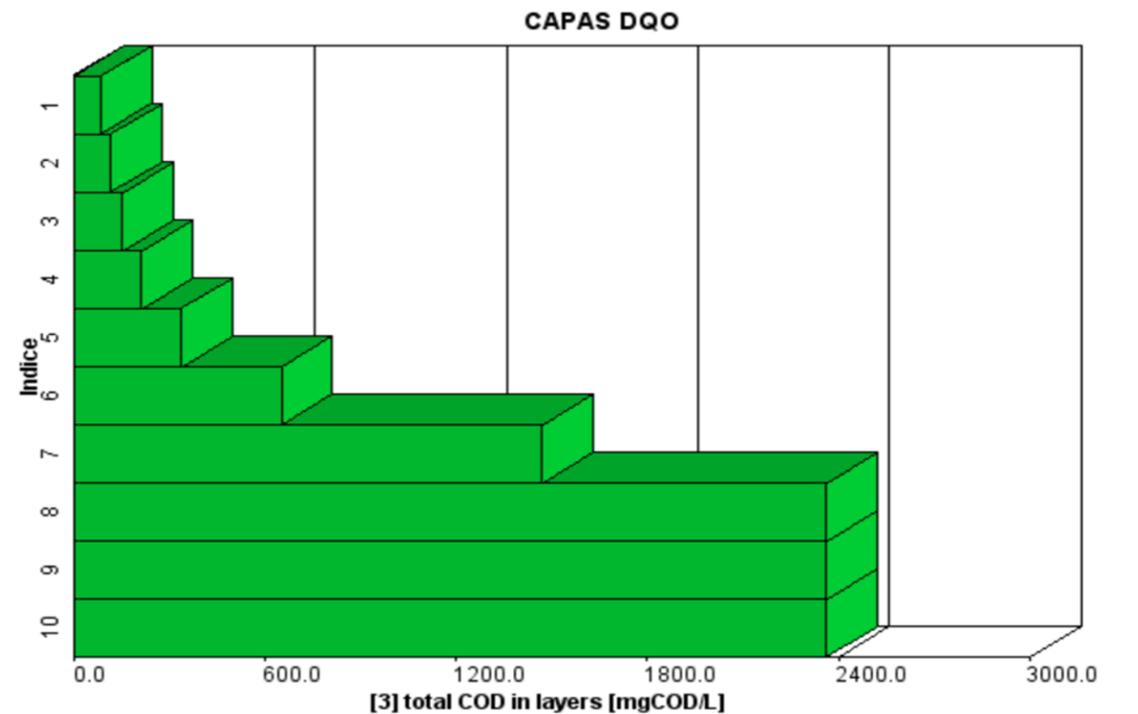


Ilustración 60. DQO en función de las capas del sedimentador.



Con los valores actualizados, la simulación de la planta dará unos datos diferentes a los anteriores, en la siguiente tabla se muestra una comparativa de los datos obtenidos antes y después de la primera optimización.

RESULTADOS SIMULACIÓN		Sin optimizar	Optimizada
		SALIDA AGUA LIMPIA	SALIDA AGUA LIMPIA
Parámetros	Unidades	Valor	Valor
Flujo	m <sup>3</sup> /d	5989,77	5989,77
SST	mg/L	11,34	29,8
VSS	mg/L	10,6	15,46
DBO <sub>5</sub>	mg/L	45,1	49,58
DQO	mg/L	89,03	103,8
TN	mgN/L	29,6	30,1
TP	mgP/L	8,4	8,4
Total Alkalinity	mgCaCO <sub>3</sub> /L	287	287
pH	-	7	7

Tabla 18. Comparativa de resultados entre la salida de agua, con la planta optimizada y sin optimizar.

En esta tabla se observa los cambios existentes a la salida del agua limpia, entre la planta de tratamiento optimizada o sin optimizar. Será necesario bajar el valor de la DBO<sub>5</sub>, para poder recircular el agua en la planta de tratamiento de granito.



Tras modificar la producción de arena por flujo en el desarenador y la superficie del sedimentador, lo siguiente que se estudiará será la optimización del caudal de recirculación ( $Q_r$ ) para comprobar si modificando este valor se logra reducir los sólidos del sistema y con ello reducir la DBO. Se realiza para ver el impacto en los sólidos suspendidos del sistema.

Analizando los resultados obtenidos, el resultado final no ha variado respecto al anterior, ya que se recircula al sistema una vez pasados los equipos de tratamiento de lodos, lo que hace que la concentración de sólidos se reduzca en el agua limpia y apenas influya en el resultado final del sistema.



## 7.7. Estudio de sensibilidad

Dicho estudio se realiza para comprobar la variación que pueden existir de los parámetros de salida, con la variación de un parámetro del sistema, debido a un error en la planta. Este estudio se realiza con el fin de estar preparados a cualquier inconveniente que se pueda sufrir.

### 7.7.1. Variación del caudal

El primer estudio de sensibilidad es referido a la variación del caudal en la entrada del sistema. Se estudiará este parámetro ya que es de vital importancia para el correcto funcionamiento de la planta. Es muy frecuente que varíe el caudal de entrada en un sistema, debido a épocas de lluvia, riadas, aumento de la producción de granito, etc. En este caso se ha estudiado la sensibilidad del flujo de entrada con respecto a dos parámetros de salida directamente relacionados como los sólidos suspendidos y la demanda biológica de oxígeno.

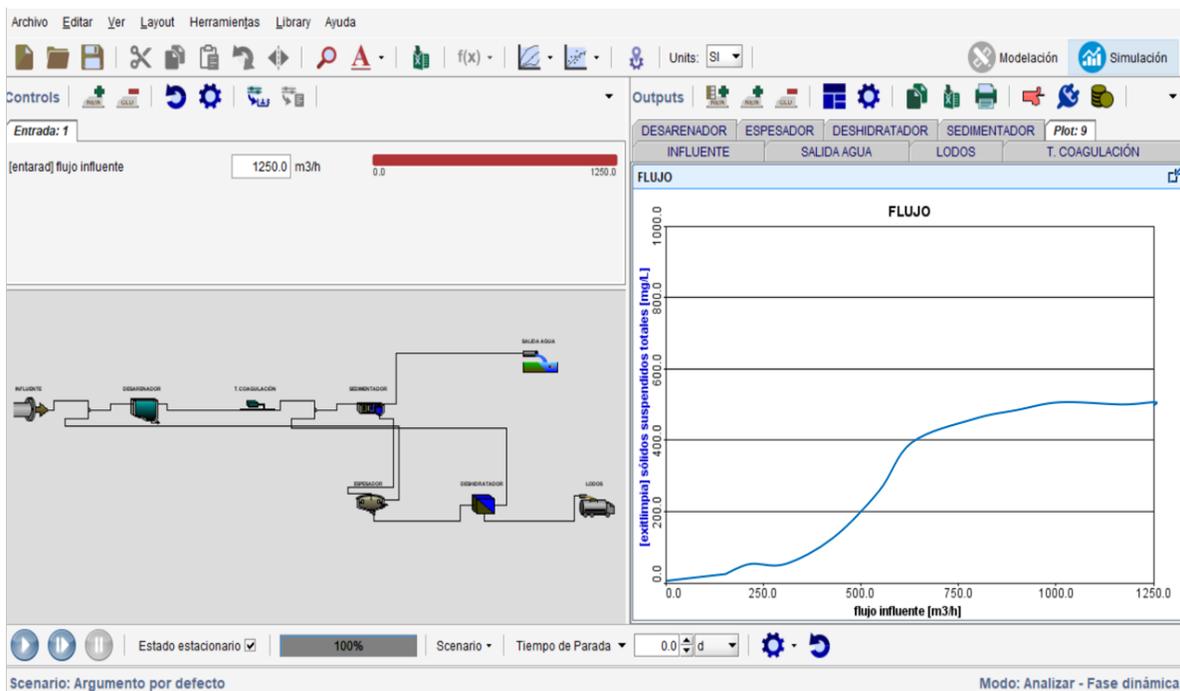


Ilustración 61. Estudio sensibilidad, flujo.



En la parte superior izquierda de la pantalla de simulación, se ha añadido la variante de entrada, flujo. Como el valor inicial era de 250 m<sup>3</sup>/h, el programa estudiará el cambio que sufre el caudal desde 0 hasta 1250 m<sup>3</sup>/h. En la parte derecha de la pantalla, se ha añadido una gráfica con una variante de salida a estudiar como son los sólidos suspendidos totales.

En el gráfico se observa como a medida que aumenta el caudal aumentan también los SST de salida. Esto se debe a que están directamente relacionados el caudal que entra con los SST, ya que cuanto más caudal entra más SST entran también. Con 350 m<sup>3</sup>/h los sólidos suspendidos de salida tendrían un valor demasiado alto para su recirculación, por lo que habrá que controlar en todo momento la entrada de caudal en la planta. En caso de conocer que existen grandes cambios de entrada de caudal, lo correcto sería añadir un tanque de homogenización de caudal.

A continuación, se muestra la variación que sufriría la DBO<sub>5</sub> en la salida del sistema al variar el caudal de la misma manera. Como se observa en la imagen, existe un cambio brusco según entra el caudal y después ese aumento se relaja. Con un caudal muy pequeño, los valores de la DBO<sub>5</sub> ya están fuera de los valores permitidos, por lo que habrá que añadir un equipo para reducir el valor de la DBO<sub>5</sub>.

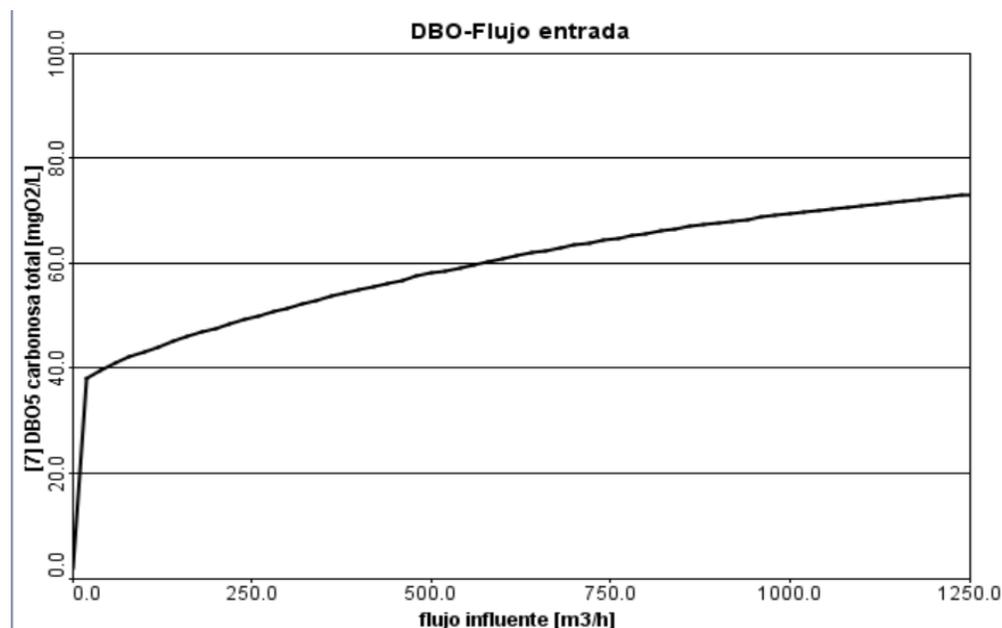


Ilustración 62. Gráfico obtenido en el estudio sensibilidad realizado con el cambio del flujo de entrada



## 7.7.2. Variación de la demanda química de oxígeno (DQO)

Se analizará en este apartado el aumento de la DQO de entrada en el proceso de tratamiento del agua residual procedente de la planta de granito. Un incremento en este valor estará siempre ligado a un aumento de la contaminación, de modo que cuanto mayor sea la DQO más contaminada estará el agua. Este aumento podría darse en caso de filtración de otra agua procedente de otra industria o en casos en los que entra la misma DQO, pero con un caudal menor, por lo tanto, su concentración será mayor.

Al tratarse de una planta en la que principalmente se deberán tratar los sólidos, se estudiará el cambio que realiza la DQO de entrada en los sólidos suspendidos de salida.

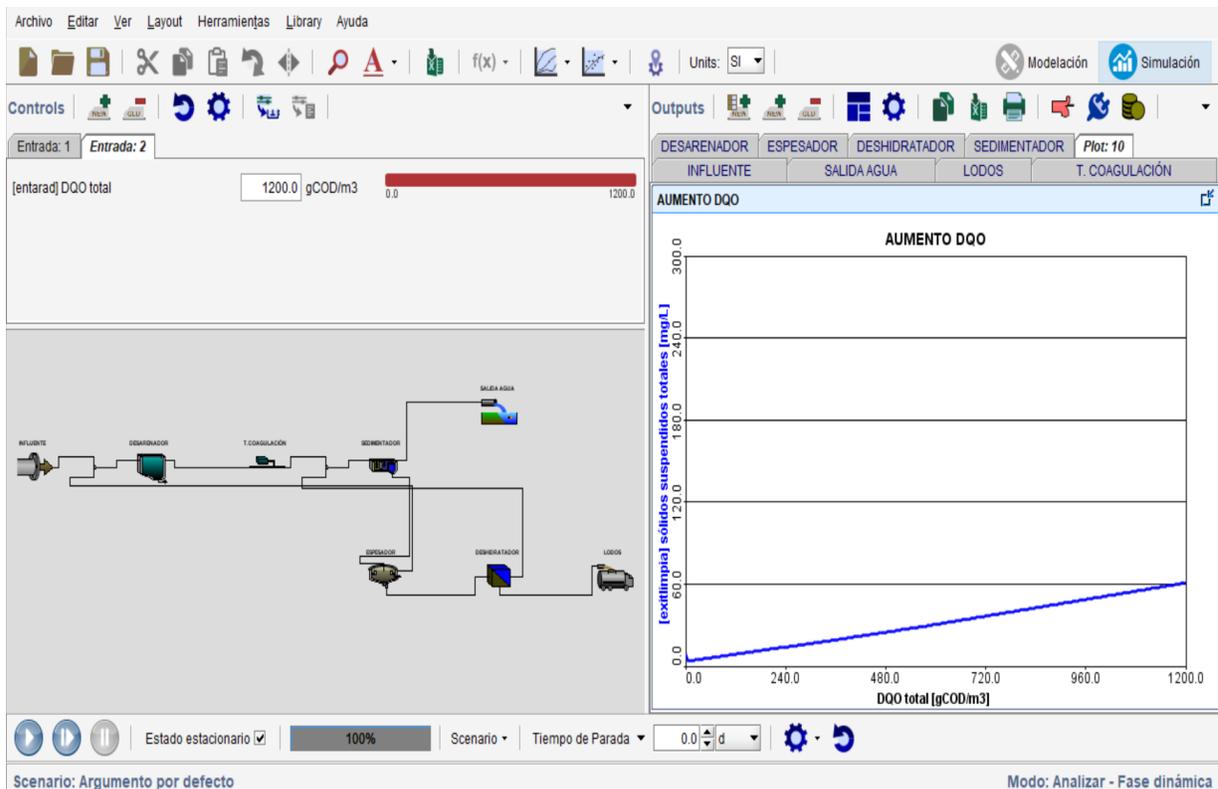


Ilustración 63. Estudio sensibilidad, DQO.

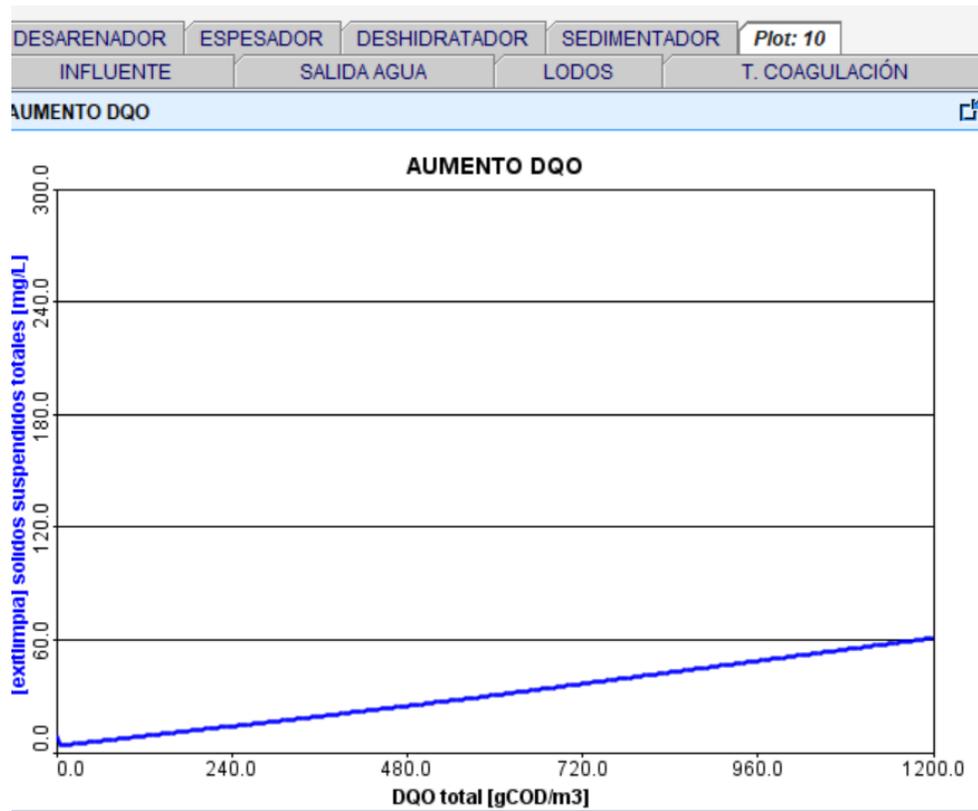


Ilustración 64. Gráfico obtenido en el estudio sensibilidad realizado con el cambio de la DQO

En la imagen anterior se muestra la gráfica obtenida del estudio de sensibilidad, como se puede observar el aumento es casi proporcional entre DQO y SST. Con el sistema diseñado se observa que la DQO, podrá aumentar hasta 480 mg/l y el valor de salida de los SST, estaría dentro del límite permitido (35 mg/l). No suele ser habitual que varíe tanto la DQO en un sistema que recibe agua residual procedente de una planta de granito, ya que las sustancias que llevan son las mismas.



### 7.7.3. Variación de la concentración de coagulante

En este estudio se ha modificado la “*chemical dosage, mass based*” introducida en el sistema como 20 kg/d. Se ha variado la dosificación química del coagulante añadido (cloruro férrico), con el fin de observar como varía en la salida de los sólidos suspendidos totales. A continuación, se muestra la captura realizada en el programa.

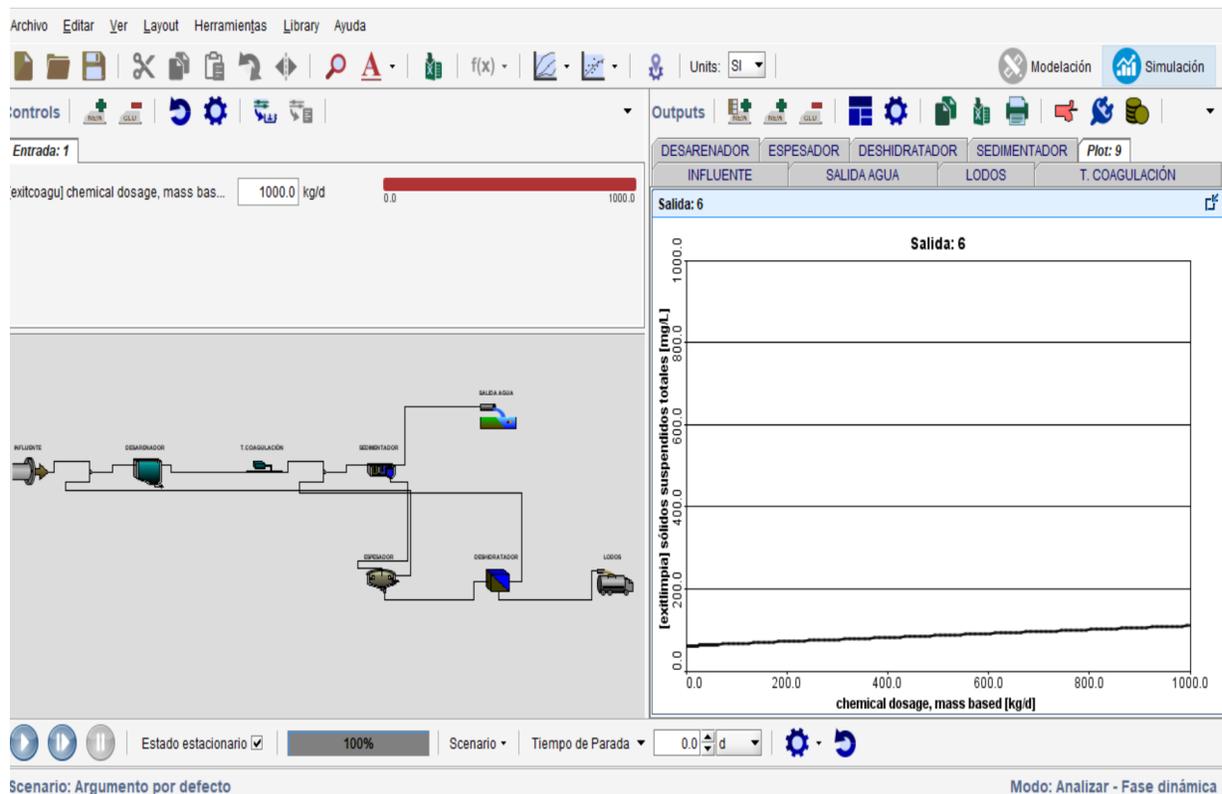


Ilustración 65. Estudio sensibilidad, dosificación química.

El aumento de la gráfica es lento, esto quiere decir que el aumento de la dosificación no altera en gran medida la salida de SST. En los valores en los que empieza a influir en la salida de los SST, son demasiado altos, ya que la dosificación química en una planta de este tipo no puede llegar a 200 kg/d. Alrededor de valores de dosificación de 20 kg/d, apenas se nota cambio en la salida de los SST.



### 7.7.4. Variación de la temperatura

En este estudio se observará la sensibilidad que tendrá este sistema al variar la temperatura. En el sistema no se añadió una temperatura de entrada, si no que se seleccionó la opción de que el programa la calculase. En este caso se estudiará la variación de temperatura entre 0° y 35°.

Como se observa en la siguiente imagen, una vez simulado el estudio de sensibilidad, se puede observar como al variar la temperatura no varia la salida de sólidos suspendidos. Por lo que se obtiene que estos dos parámetros no están relacionados. A temperaturas críticas, ya sean altas o bajas, es posible que baje el rendimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales, pero en ese caso el programa no lo detectaría, ya que podrían ser fallos en las bombas o tuberías.

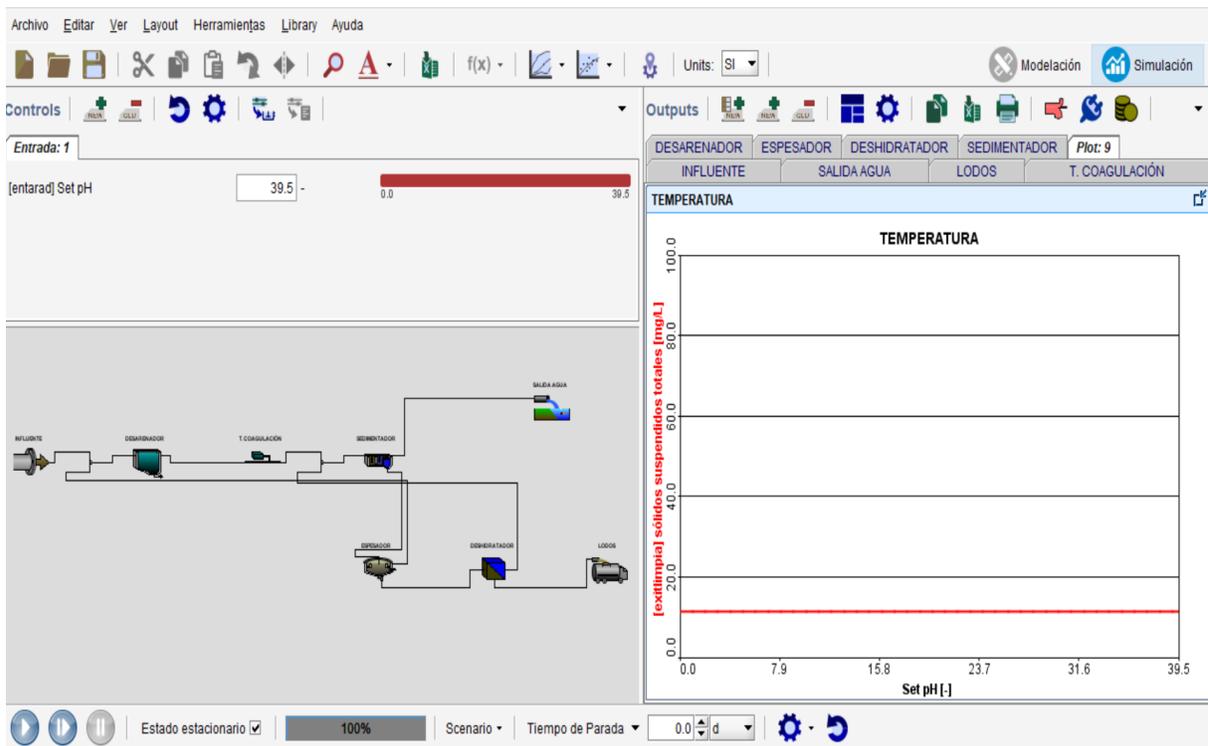


Ilustración 66. Estudio sensibilidad realizado de la temperatura



### 7.7.5. Variación del pH

Por último, se ha realizado un estudio de la sensibilidad relacionado con el pH. El pH inicial, se situó en 7,9 (minera, 2021) y lo que se tratará de estudiar es de si la variación del pH en la entrada del sistema influye en la salida de sólidos suspendidos.

Al simular el programa, se observa como aparece una línea recta en la gráfica, lo que quiere indicar que la variación del pH, entre 0 y 14, no varía la salida de los SST. Eso quiere decir que esos dos parámetros no están relacionados.

No obstante, una variación del pH inicial, si variase en la salida de la muestra final, ya que ya no saldría con un pH 7 (neutro), si no que este valor cambiaría y podría salirse de los límites exigidos que son entre 6 y 7,5.

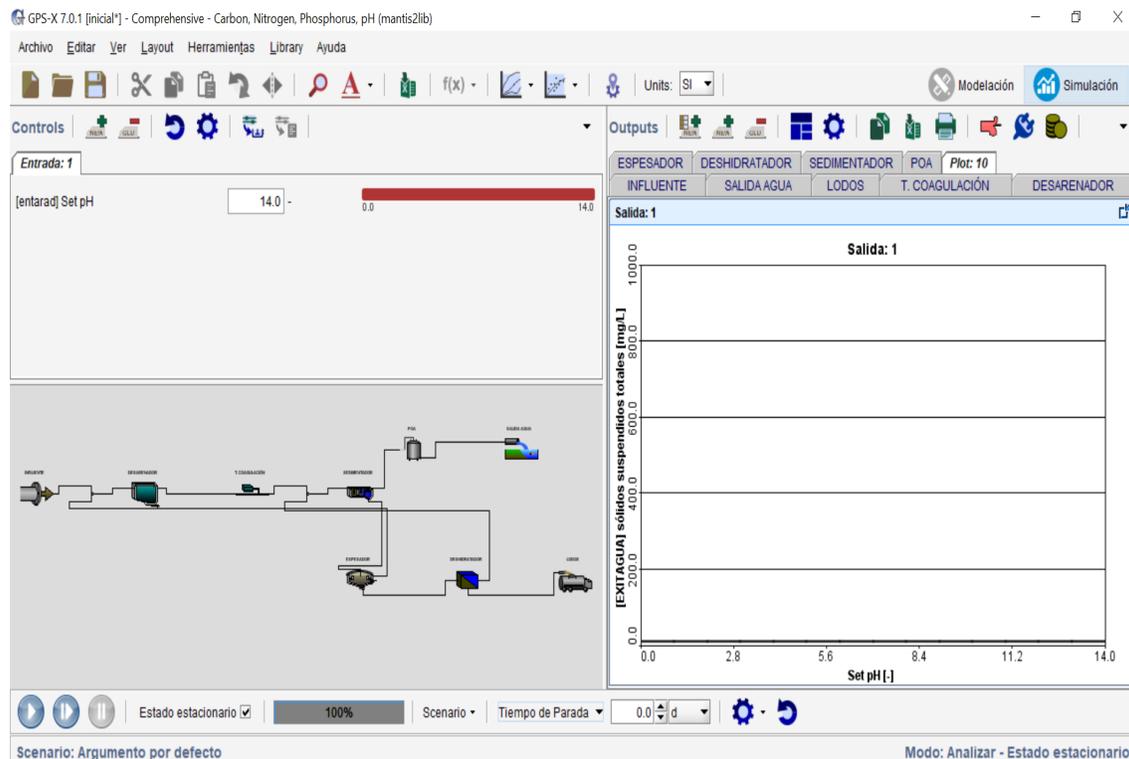


Ilustración 67. Estudio sensibilidad realizado del pH

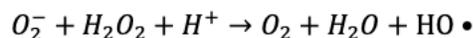
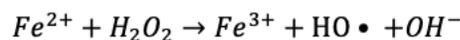


## 7.8. Esquema final GPS-X

Habiéndose realizado un esquema inicial, una primera modificación, la optimización del esquema y habiendo observado los estudios de sensibilidad realizados, el valor de DBO<sub>5</sub>, que sigue saliendo del esquema es de 49,1 mg/l > 25 mg/l que exige la ley para la recirculación de las aguas. Por lo tanto, habrá que solucionar dicho problema añadiendo un equipo al esquema que consiga degradar materia orgánica disuelta.

Se plantean varios equipos para la eliminación de dicha materia, como, por ejemplo, sistemas de flotación, filtros de arena, filtros de membrana, lodos activados, procesos de oxidación avanzada o equipos de microfiltración. Algunos de estos equipos se descartan, ya que no aparecen en el programa GPS-X, otros debido a su alto precio, el filtro de membranas con el flujo de entrada sería ineficaz. Finalmente, se decide seleccionar el proceso de oxidación avanzada (POA), ya que es ideal para la degradación de materia orgánica disuelta. (Ortiz Mingo, 2015)

Los procesos de oxidación avanzada encuentran su aplicación principal en el tratamiento terciario, siendo el objetivo de estos procesos eliminar compuestos difícilmente biodegradables e incluso disminuir la contaminación microbológica. Los POA se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes, que involucran la generación y uso de especies poderosas transitorias, principalmente el radical hidroxilo (OH•). Este radical posee alta efectividad para la oxidación de materia orgánica en condiciones suaves de presión y temperatura, hasta la mineralización completa de estos contaminantes. Debido a la altísima reactividad de estas especies es posible eliminar tanto compuestos orgánicos como inorgánicos logrando así una reducción de DQO, DBO y toxicidad en las aguas residuales tratadas. (Bes Monge, 2012).





Las ecuaciones que se han mostrado en la pagina anterior, son las ecuaciones de generación del radical hidroxilo (OH•).

#### **Ventajas de los procesos de oxidación avanzada:**

- No solo cambian de fase al contaminante (como ocurre en el arrastre con aire o en el tratamiento con carbón activo), sino que lo transforman químicamente hasta la mineralización completa (destrucción) del contaminante.
- Capacidad potencial para llevar a cabo una profunda mineralización de los contaminantes orgánicos y oxidación de compuestos inorgánicos hasta dióxido de carbono e iones (cloruros, nitratos...).
- Pueden no generar subproductos, como los lodos que requieran posterior procesamiento, tratamiento y/o eliminación.
- Los reactivos utilizados como oxidantes son generalmente sustancias que se descomponen durante el proceso en productos inocuos.
- Generalmente mejoran las características organolépticas (olor, sabor, color...) de las aguas tratadas.

#### **Desventajas de los procesos de oxidación avanzada:**

- Elevado coste, especialmente en lo que respecta al ozono y la radiación ultravioleta.
- Pueden formar subproductos de reacciones indeseables en algunos casos.
- Necesitan, en algunos procesos, de tiempos de reacción elevados.



El siguiente paso realizado ha sido la introducción del nuevo equipo en el programa GPSX, el cual se ha realizado en la planta de modelización. Se ha seleccionado el icono del proceso de oxidación avanzada (*Advanced Oxidation Process*) y se ha introducido después del sedimentador. Dicho icono se encuentra en el menú de terciario, y el símbolo que utiliza es el que aparece a continuación:

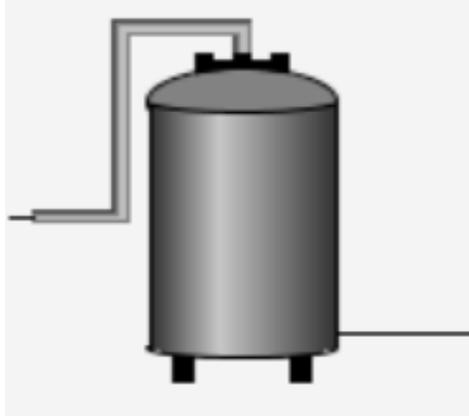


Ilustración 68. GPS-X, símbolo del equipo de proceso de oxidación avanzada

Una vez introducido el equipo en el esquema se introducen los datos de igual manera que se hicieron anteriormente con el resto de los equipos. En este caso se dejarán los datos que aparecen en el programa, ya que no se tienen datos para calcularlos. Y lo que se hará posteriormente es una optimización del equipo en función de la salida de DBO<sub>5</sub>, y de ahí se sacaran los datos finales a introducir en el proceso de oxidación avanzada. A continuación, se muestran los datos introducidos de primeras al equipo.

Operacional			
<b>Oxidant Dose</b>			
[54] oxidant dose	<input type="text" value="10.0"/>	mg/L	▼
[54] oxidant effectiveness factor	<input type="text" value="0.1"/>	-	▼
[54] maximum cod removal efficiency	<input type="text" value="0.99"/>	-	▼
<input type="button" value="Más ..."/>			
		<input type="button" value="Aceptar"/>	<input type="button" value="Cancelar"/>

Ilustración 69. Datos introducidos en el equipo de proceso de oxidación avanzada



Después se ha realizado una simulación y se han observado los datos de salida del agua limpia, obteniendo valores muy similares de DQO y SST, y reduciendo de manera suave la  $DBO_5$ , pasando de 49,1 mg/l a 44,6 mg/l.

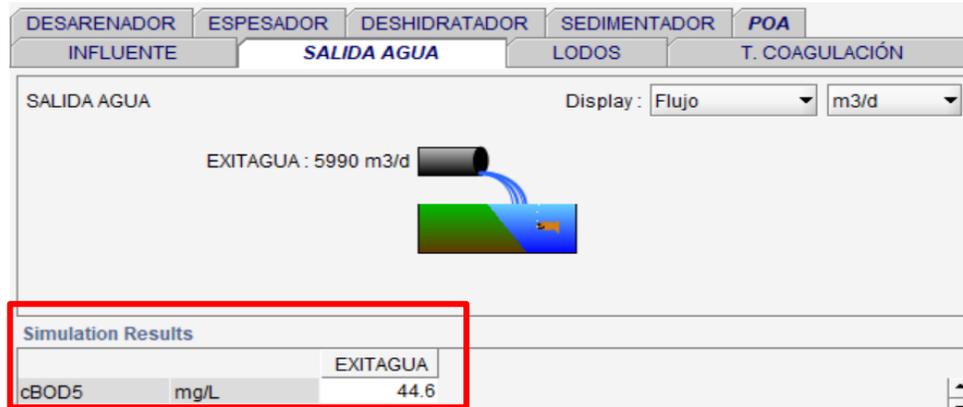


Ilustración 70. Resultados de la primera simulación añadiendo el proceso de oxidación avanzada

Esto hace indicar que con este equipo se reduce el valor de la  $DBO_5$ , por lo que deberemos optimizar los valores de dosis del oxidante y efectividad en función del parámetro final a obtener, 22 mg/l de  $DBO_5$ . Así mismo se repetirán los pasos realizados en el apartado de optimización y los valores obtenidos, que se han introducido en el equipo son los siguientes:

Parameter	Value	Unit
[EXITAGUA] oxidant dose	20.0	mg/L
[EXITAGUA] oxidant effectiveness factor	0.3	-
[EXITAGUA] maximum cod removal efficiency	0.99	-

Ilustración 71. Datos finales del proceso de oxidación avanzada

Con estos datos ya introducidos y con todos los demás equipos con sus respectivos datos y optimizados, se realiza una simulación para observar los resultados obtenidos:

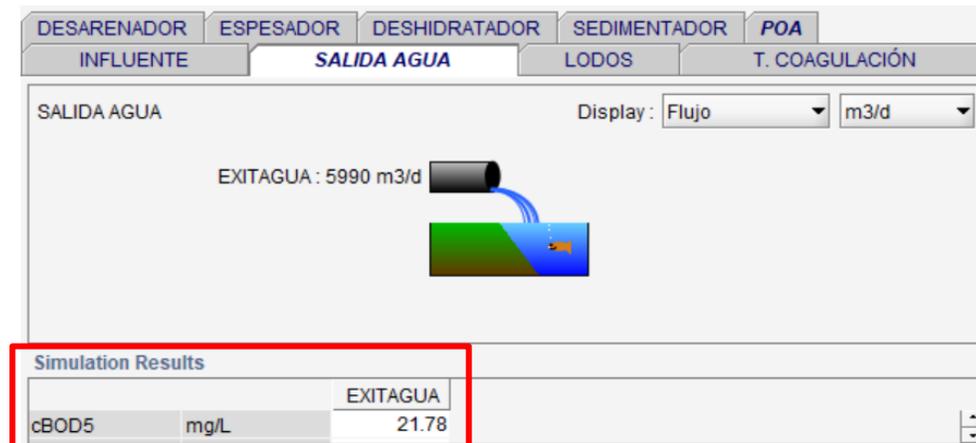


Ilustración 72. Resultados obtenidos en la simulación final

Como se observa en la imagen anterior la DBO<sub>5</sub>, está dentro de los parámetros exigidos para la recirculación del agua en la propia planta, por lo que se puede añadir que el proceso de oxidación avanzada está realizando su trabajo de manera óptima.

A continuación, se muestra una tabla con los valores que se obtienen de agua limpia al final del proceso, con el esquema final modificado.

RESULTADOS SIMULACIÓN		Esquema final
		SALIDA AGUA LIMPIA
Parámetros	Unidades	Valor
Flujo	m <sup>3</sup> /d	5990
SST	mg/L	28,7
VSS	mg/L	10,68
DBO <sub>5</sub>	mg/L	21,78
DQO	mg/L	96,8
TN	mgN/L	29,64
TP	mgP/L	8,4
Total Alkalinity	mgCaCO <sub>3</sub> /L	282,2
pH	-	7.0

Tabla 19. Resultados finales del sistema de tratamiento de aguas residuales



Mostrados los resultados finales y viendo que lo valores están dentro de los límites permitidos, se puede asegurar que el agua procedente de la planta de tratamiento de granito ha sido tratada de manera óptima. Ahora, como se hizo con anterioridad, y con el fin de que se vea el sistema de manera más visual, se añadirán los diagramas de Sankey, tanto de flujo (que será idéntico al anterior, debido a que el equipo POA, no retiene agua) como de DQO y SST (que en este caso si variará el diagrama debido a que existe una pequeña reducción en dichas concentraciones).

- **Flujo:**

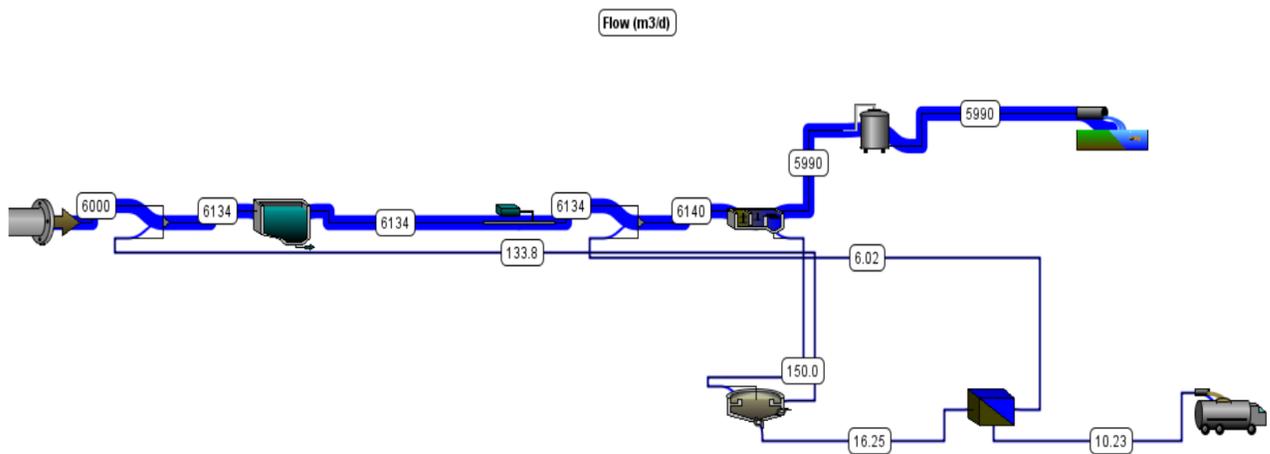


Ilustración 73. Diagrama Sankey flujo final.



- **DQO:**

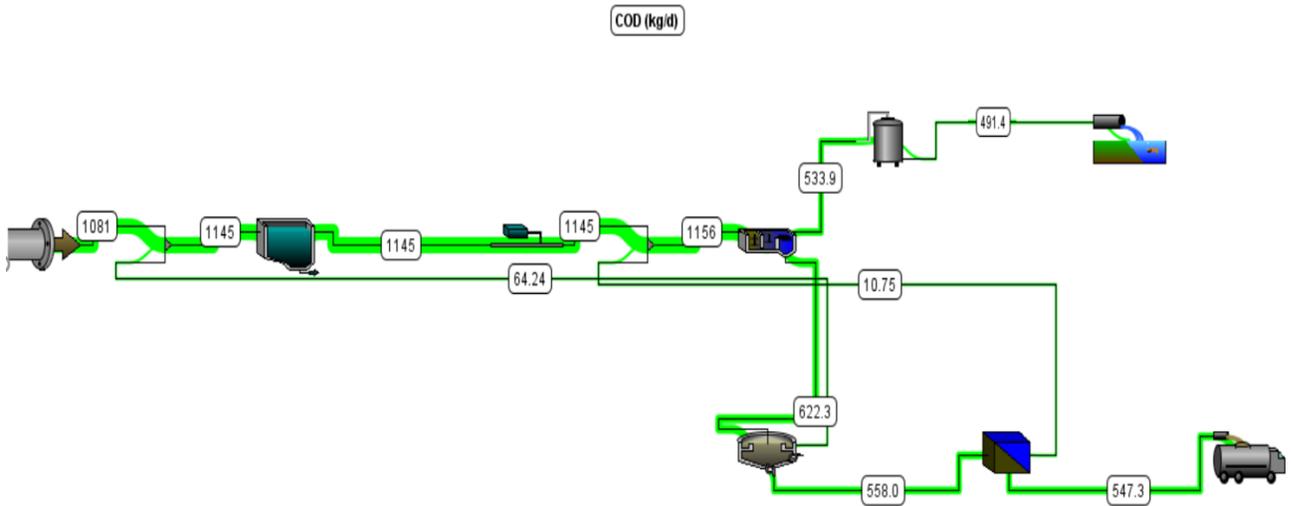


Ilustración 74. Diagrama Sankey DQO final.

- **SST:**

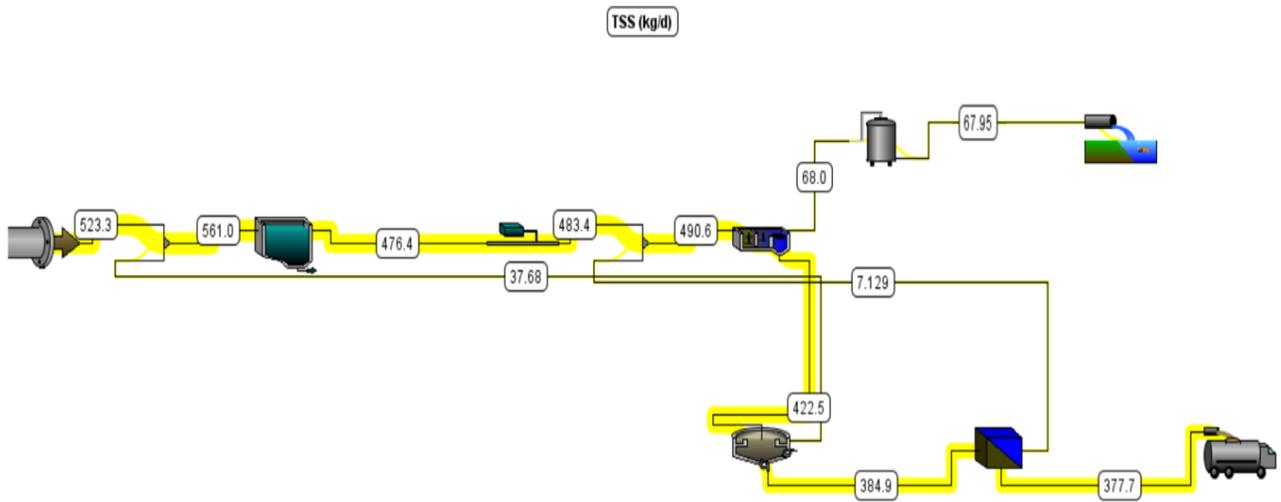


Ilustración 75. Diagrama Sankey SST final.



### 7.8.1. Diagrama final GPS-X

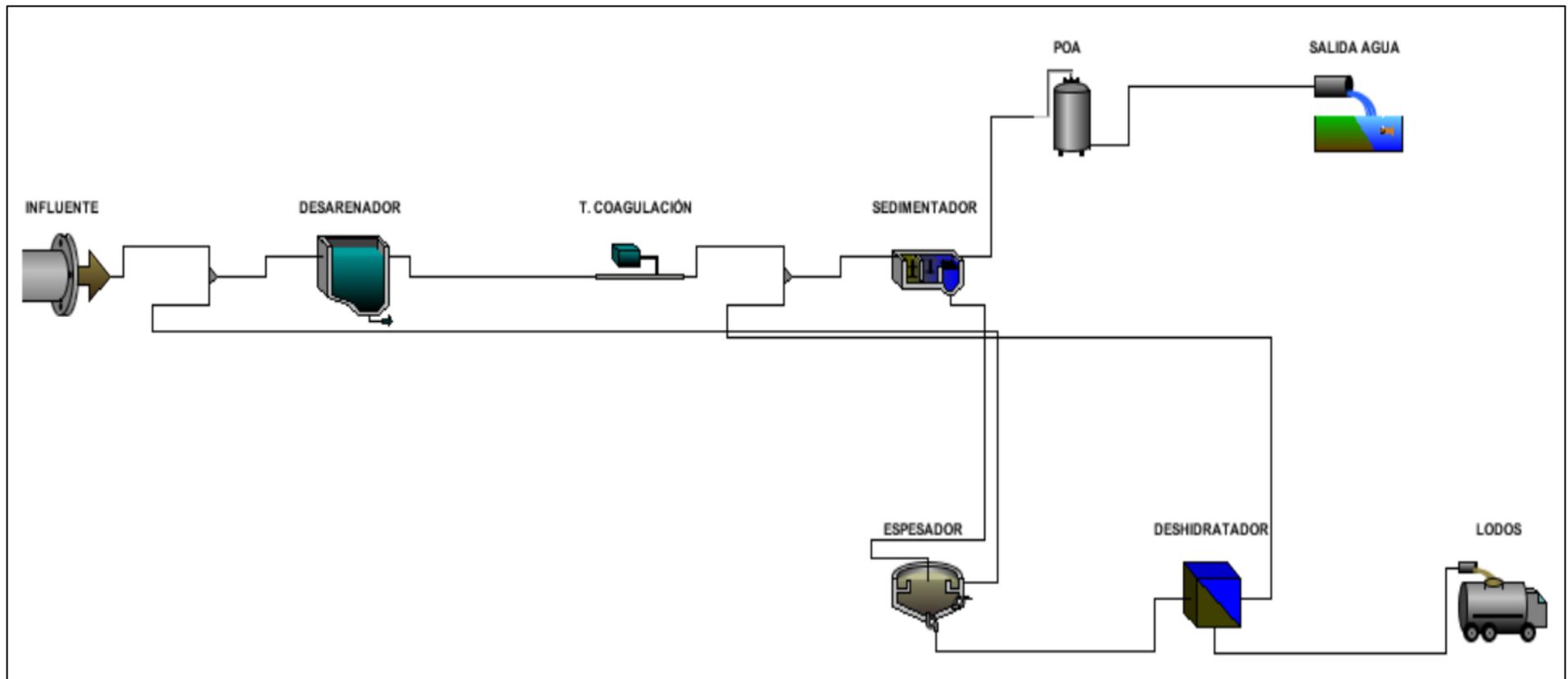


Ilustración 76. Diagrama final de la planta de tratamiento de aguas residuales en el GPS-X.



## 8. BALANCE ECONOMICO

A continuación, se lleva a cabo el balance económico de la planta de tratamiento de aguas residuales mineras proyectada en este trabajo.

El programa GPS-X, tiene un apartado muy versátil y funcional, el cual añadiendo los costes al esquema crea un diagrama de Sankey realizando un balance económico. Con esto es posible visualizar el consumo que tendrá la planta de tratamiento. Para ello en la pantalla inicial de modelización, en cada equipo, se deberán introducir como datos de entrada los costes operacionales.

Los datos obtenidos han sido facilitados por Cogersa S.A.U, VWR (part of avantor), Sigma-Aldrich y Sader. Dichos datos introducidos se muestran en la siguiente tabla.

DATOS		
Parámetros	Unidades	Valor
Costo eliminación arena	€/kg	0,03381
Coagulante (cloruro férrico)	€/L	0,35
Costo desecho lodos (sedimentador)	€/m <sup>3</sup>	9,09
Costo desecho lodos (espesador)	€/m <sup>3</sup>	9,09
Costo desecho lodos (deshidratador)	€/m <sup>3</sup>	9,09
Proceso de oxidación avanzada (O <sub>3</sub> )	€/kg	1,26
Consumo medio planta	€/KWh	0,1452
Consumo medio planta	KW /m <sup>3</sup>	0,675

*Tabla 20. Datos introducidos del coste operativo de cada equipo de la planta de tratamiento*



Con los datos introducidos en cada equipo, se simula de nuevo el programa, y en la pantalla de simulación se seleccionará el botón marcado en la siguiente imagen. Esto creará un diagrama de Sankey con un resumen de costes de operación.

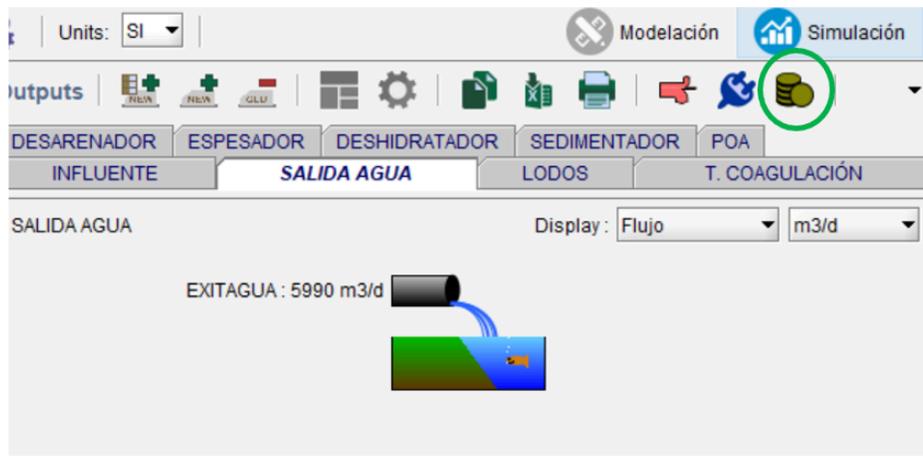


Ilustración 77. GPS-X, pantalla de simulación en la que aparece el botón de los costes de operación

Finalmente, se obtiene un diagrama de Sankey, el cual gráficamente dará el coste total de la planta de tratamiento de aguas residuales y la división por cada equipo. Además de este diagrama se obtiene una tabla en la cual vienen los valores desglosados por tipo de coste y tipo de equipo, para que sea fácilmente analizable el coste de cada equipo y de cada trabajo.

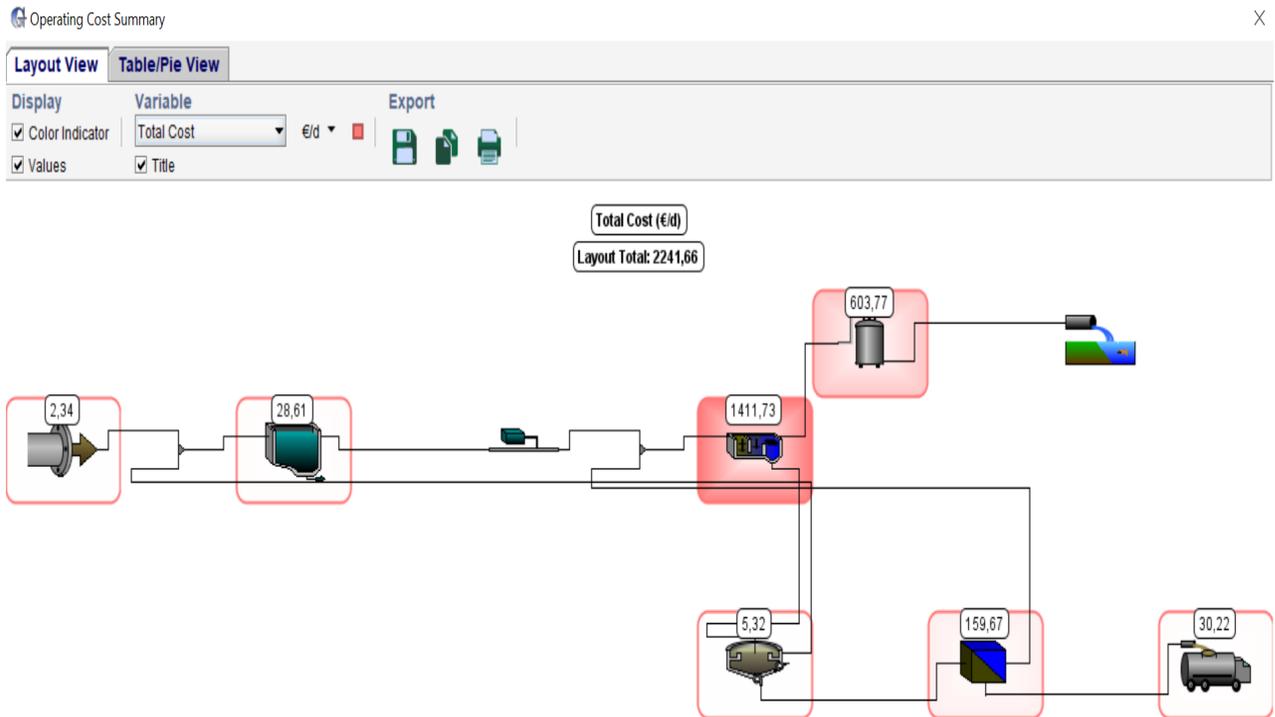


Ilustración 78. GPS-X, diagrama Sankey de los costes de operación de la planta de tratamiento

En el diagrama de Sankey anterior se muestra el coste total de la planta de tratamiento, incluyendo costes de aireación, bombeo, dosis químicas y tratamiento de lodos. Como se observa en la imagen, el coste total será de 2241,66 (dos mil doscientos cuarenta y un euros con sesenta y seis céntimos) €/día. Lo que equivale a un balance económico de 818.205,9 €/año (ochocientos dieciocho mil doscientos cinco euros con diecinueve céntimos).

A continuación, se mostrará una tabla en la cual se desglosarán los costes producidos por la planta. Dicha tabla se obtiene del programa GPS-X y servirá para analizar los equipos de manera individual. Los datos se darán en euros por día.



COSTES (€/d)					
	Bombeo	Compuesto	Dosis química	Tratamiento lodos	Total
Influyente	2,34	----	----	----	2,34
Desarenador	0,00	----	----	28,61	28,61
Sedimentador	0,23	48,00	197,3	1166,2	1411,73
Espesador	0,04	5,28	----	----	5,32
POA	----	----	603,77	----	603,77
Deshidratador	0,02	5,28	----	154,37	159,67
Lodos salida	----	----	----	30,22	30,22
<b>Total</b>	<b>2,62</b>	<b>58,56</b>	<b>603,77</b>	<b>1576,70</b>	<b>2241,66</b>

Tabla 21. Resumen de los costes de operación producidos en la planta

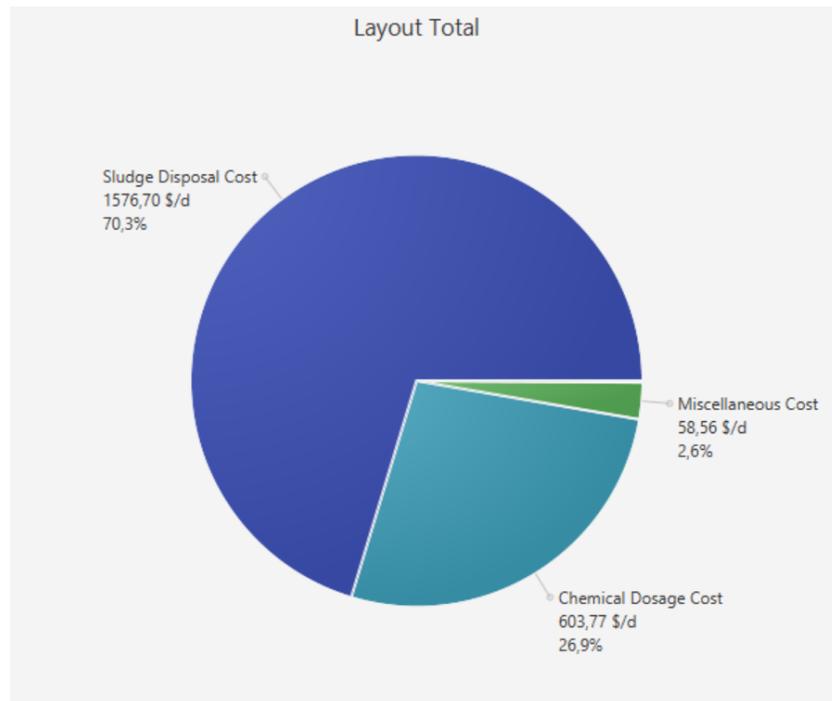


Ilustración 79. Porcentajes de los costes de operación en función de cada tipo de trabajo



Con el resumen realizado se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- No se tienen costes de aireación en la planta, ya que ningún equipo recurre a ella.
- El gasto del influente es debido al bombeo del agua de entrada.
- El gasto del desarenador será el gasto de tratamiento de arenas, que será un total de 28,61 €/d.
- El sedimentador, como es de esperar, es el equipo que más consume. Ya que tiene costes de todos los tipos, dosis químicas (coagulación-floculación), bombeo, y debido al tratamiento de lodos.
- El equipo de proceso de oxidación avanzada es un equipo de altos costes ya que consume 603,77 €/d, pero es necesario este equipo en la planta.
- El deshidratador genera un coste diario de 154,37 €, debido al alto número de lodos que se generan en la planta.
- El 70,3% de los costes de operación son derivados del costo de desecho de lodos.

Finalmente, y como suma de todos los gastos se obtiene que el gasto de esta planta de tratamiento de aguas residuales procedentes de la planta de tratamiento de granito tiene unos costes de 2241,66 €/d. Será un gasto alto, aunque se compensa al recircular el agua en el propio sistema, y así abaratar el coste de consumo de 250 m<sup>3</sup>/h de agua limpia.



## 9. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de fin de estudios se ha diseñado y simulado mediante el programa GPS-X un sistema de tratamiento de aguas residuales para la depuración de los efluentes producidos en una planta de tratamiento de Granito. Estas aguas residuales, con elevadas concentraciones de sólidos suspendidos, presencia de minerales y materia orgánica disuelta, han sido tratadas mediante diversas técnicas de carácter fisicoquímico. Comenzando con un pretratamiento, y siguiendo con tratamiento primario, tratamiento de lodos y tratamiento terciario, se ha alcanzado el objetivo de obtener un efluente clarificado que cumple con las exigencias establecidas por la legislación vigente sobre recirculación de vertidos (R.D.1620/2007, 2007).

La utilización conjunta de equipos de desarenado como técnica de pretratamiento y procesos de coagulación y floculación con el añadido de un proceso de sedimentación como tratamiento primario, ha demostrado su eficacia en la reducción del contenido en sólidos suspendidos y demanda química de oxígeno.

Los ensayos de laboratorio realizados han sido fundamentales, para obtener la dosis y el tipo de coagulante y floculante a utilizar, ya que tener un diseño inicial es importante para introducirle buenos datos al programa, lo que a posteriori, facilitaría mucho las simulaciones.

La optimización de la planta ha sido imprescindible, para que dicha planta no trabajase por encima o por debajo de sus posibilidades, mediante el programa GPS-X, se ha conseguido realizar la optimización para que la planta saque el mayor rendimiento posible, con el menor trabajo.

Mediante el empleo de procesos de oxidación avanzada, se ha conseguido reducir la materia orgánica disuelta, y por lo tanto el valor de la DBO<sub>5</sub>, valor que, con la primera modificación del esquema en el programa, no cumplía los valores exigidos por la ley.



La planta creada en el programa GPS-X, para el tratamiento de aguas residuales, no producirá un beneficio económico directo. Ya que el fin de estas aguas residuales será la recirculación en la planta de tratamiento de granito. Por lo que lo que hará será producir un ahorro de gasto de agua en dicha planta de tratamiento, lo que indirectamente abaratará el coste del granito.

El sistema de tratamiento realizado en el presente documento es una instalación totalmente necesaria para eliminar las diversas cargas contaminantes presentes en el agua y, de este modo, recircularla en la planta de forma segura para el medio ambiente y los ecosistemas que habitan en el mismo.



## BIBLIOGRAFÍA

Pares, María. Académica, T. (1995). *Tesis*. Obtenido de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/911/Capitulo6.pdf>

Ambiente, D. d. (2020). *Apuntes 1º Máster*. Oviedo.

Bes Monge, S. (2012). *Cyted - Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales*.

Bref, D. (2003). *Prevención y control integrados de la contaminación (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino)*.

Bueno, J. L., Sastre, H., Lavín, A. G. (1997). *Contaminación e ingeniería ambiental*. Vol. III: contaminación de las aguas. Ficyt, Oviedo.

Cabaleiro. (Marzo de 2021). *Granitos Cabaleiro*. Obtenido de <https://granitoscabaleiro.com>

Corbitt. (2003). *Manual de referencia de la ingeniería ambiental*. Madrid: McGraw-Hill.

De Luis Alvarez, A. M. (2013). *Fundamentos Ingeniería Ambiental*. UPV.

Desing, P. (2020). *Pedra desing*. Obtenido de <https://pedradesign.es/esculturas/como-se-forma-granito-de-donde-extrae/> (Abril, 2021)

Fernandez, M. (2013). *TFG. Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales con reactores de membranas*.

Gomez Nieto, M., & Hontoria Garcia, E. (2006). *Técnicas Analíticas en el control de la ingeniería ambiental*.

Hernandez Muñoz, A. (1992). *Depuración de aguas residuales*. Bilbao: Paraninfo.



Maresch, & Medenbach. (1990). *Rocas*.

Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales* (Vol. I).

Metcalf & Eddy, I. (2003). *Wastewater engineering : treatment and reuse, Fourth edition*.

Mijares, G. R. (1978). *Diseño de desarenadores y sedimentadores*. Lima. Página: 56.

Minera, Emp. (2021). *Datos aportados empresa minera*.

*Minería sostenible Galicia*. (2019). Obtenido de <https://minariasostible.gal/es/inicio/> (Mayo,2021)

Ortiz Mingo, J. (2015). *Tratamientos avanzados de agua para la eliminación de materia orgánica disuelta*.

R.D.1620/2007. (2007). *Real Decreto* .

Santander, E. d. (2010). *Reproducción asignatura "Contaminación del Agua"*. . Universidad de Cantabria.

*SOFTWARE GPS-X*. (s.f.).

U., A. (2017). *TFG. Diseño sistema tratamiento aguas residuales*.

UPM. (2007). *Explotaciones de Roca Onamental*.

Urrusuno, A. (2017). *Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales para la depuración de efluentes procedentes de un lavadero de carbón*.



Simulación mediante GPS-X del proceso de acondicionamiento de aguas residuales procedentes de actividades mineras para su reutilización en el propio sistema.

---

