



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:

*Diseño de un digestor de fango anaerobio con producción de biogás. Estudio de cogeneración.*

*Diseño de un digestor de fango anaerobio con producción de biogás. Estudio de cogeneración.*

*A mis padres y mis hermanos, por acompañarme en esta etapa tan bonita, animarme siempre a seguir adelante y ser una mujer independiente.*

*A mi marido, por su confianza y apoyo incondicional.*

*A mis compañeros, María y Santiago, que sin ellos estudiar no hubiera sido lo mismo.*

*A mi tutora y cotutor, Isabel y Jorge, por su paciencia, ayuda y positividad.*

*A la empresa DAM-ALZIRA, por la oportunidad brindada de formar parte de su equipo.*

*Diseño de un digestor de fango anaerobio con producción de biogás. Estudio de cogeneración.*

## **RESUMEN**

El aumento de población hace que cada día sea más imprescindible la necesidad de optimizar la depuración de las aguas residuales. Así mismo, con ello aumenta la cantidad de subproducto procedente principalmente del tratamiento primario y secundario, el cual se le denomina fango.

Tras la eliminación parcial o completa de los contaminantes presentes en las aguas residuales, éstos se concentran en el fango. Por ello, es necesario su posterior tratamiento, como la reducción de la presencia de agua para facilitar su manejo y la estabilización para evitar problemas de fermentación y putrefacción.

El fango puede ser estabilizado por diferentes procesos, centrándonos en este Trabajo de Fin de Grado en la estabilización de fango por medio de la digestión anaerobia, en la cual los microorganismos descomponen la materia biodegradable en ausencia de oxígeno. Además, en la digestión anaerobia se genera una mezcla gaseosa denominada biogás, compuesta principalmente de dióxido de carbono y metano.

En el presente Trabajo de Fin de Grado se ha realizado el diseño de un digestor anaerobio con su posterior aprovechamiento de biogás para la producción de energía eléctrica a través de un motor de cogeneración. Para ello, se han analizado diferentes puntos de una Estación Depuradora de Aguas Residuales, Depuración de Aguas del Mediterráneo, S.A.-UTE S Y D AGUAS ALZIRA, durante un periodo de tres meses.

Por último, tras el diseño de la línea de fango y la línea de biogás, se ha realizado una valorización de la producción de metano para un posterior estudio económico, en el cual se contabiliza el ahorro económico que supone la producción de energía eléctrica a partir de dicho biogás.

**PALABRAS CLAVES:** Digestión anaerobia, fango, biogás, cogeneración.

## **RESUM**

L'augment de població fa que cada dia siga més imprescindible la necessitat d'optimitzar la depuració de les aigües residuals. Així mateix, amb això augmenta la quantitat de subproducte procedent principalment del tractament primari i secundari, el qual se li denomina fang.

Després de l'eliminació parcial o completa dels contaminants presents en les aigües residuals, estos es concentren en el fang. Per això, és necessari el seu posterior tractament, com la reducció de la presència d'aigua per a facilitar el seu maneig i l'estabilització per a evitar problemes de fermentació i putrefacció.

El fang pot ser estabilitzat per diferents processos, centrant-nos en este Treball de Fi de Grau en l'estabilització de fang per mitjà de la digestió anaeròbia, en la qual els microorganismes descomponen la matèria biodegradable en absència d'oxigen. A més, en la digestió anaeròbia es genera una mescla gasosa denominada biogàs, composta principalment de diòxid de carboni i metà.

En el present Treball de Fi de Grau s'ha realitzat el disseny d'un digestor anaerobi amb el seu posterior aprofitament de biogàs per a la producció d'energia elèctrica a través d'un motor de cogeneració. Per a això, s'han analitzat diferents punts d'una Estació Depuradora d'Aigües Residuals, Depuración de Aguas del Mediterraneo, S.A.-UTE S Y D AGUAS ALZIRA, durant un període de tres mesos.

Finalment, després del disseny de la línia de fang i la línia de biogàs, s'ha realitzat una valoració de la producció de metà per a un posterior estudi econòmic, en el qual es comptabilitza l'estalvi econòmic que suposa la producció d'energia elèctrica a partir del dit biogàs.

**PARAULES CLAU:** Digestió anaeròbia, fang, biogàs, cogeneració.

## **ABSTRACT**

The increase in the population makes that every day is more indispensable the need to optimize the purification of the waste water. In this way, the amount of subproduct precedent mainly from the primary and secondary treatment rise, and it's called mud.

The partial or total elimination of the contaminants presents in the waste water are concentrated in the mud. Therefore, further treatment is necessary, as the reduction of the water presence to facilitate his managing, and the stabilization to avoid problems of fermentation and rot.

The mud can be stabilized by different processes, in this Finally Degree Project we focus on the stabilization of mud by means of anaerobic digestion, in which the microorganisms break down and digest organic matter in absence of oxygen. Then, a mix gas is made by the anaerobic digestion, which is denominated biogas principally composed by carbon dioxide and methane.

In this Finally Degree Project an anaerobic digester has been design by his later utilization of biogas for production of electric power across an engine of cogeneration. For it, different points of a depuration plant have been analysed, Depuradora de Aguas del Mediterraneo, S.A. - UTE S Y D ALZIRA, during a period of three months.

Finally, after the design of the line of mud and the line of biogas, the production of methane valuation has been realized for a later economic, in which there is assessed the economic saving that supposes the production of electric power from the above mentioned biogas.

**KEY WORDS:** Anaerobic digestion, mire, biogas, cogeneration.

*Diseño de un digestor de fango anaerobio con producción de biogás. Estudio de cogeneración.*



## ÍNDICE

### Documentos contenidos en el TFG

- I. Memoria.
- II. Presupuesto.
- III. Planos.
- IV. Anexos.

### DOCUMENTO I: MEMORIA.

1. Justificación .....	1
2. Objetivos .....	3
3. Antecedentes .....	5
3.1. Estación depuradora de agua residual (EDAR) .....	5
3.2. Digestión anaerobia de fangos .....	7
3.3. Biogás .....	10
3.4. Descripción de las instalaciones .....	10
4. Depuración de Aguas del Mediterráneo, S.A. – UTE S y D AGUAS ALZIRA .....	13
4.1. Localización y situación general .....	13
4.2. Instalaciones .....	14
5. Determinación de parámetros .....	15
5.1. Medida del pH .....	15
5.2. Medida de la conductividad .....	15
5.3. Medida de sólidos suspendidos .....	16
5.4. Medida de sólidos totales y volátiles .....	17
5.5. Medida de alcalinidad y acidez volátil .....	18
5.6. Medida de sólidos decantables .....	20
5.7. Medida de la demanda química de oxígeno .....	21
5.8. Medida de la demanda bioquímica de oxígeno .....	22
5.9. Medida de nitrógeno amoniacal .....	23
5.10. Medida de nitrógeno nítrico .....	23
5.11. Medida de nitrógeno total .....	24
5.12. Medida de fósforo total .....	24
5.13. Medida de la composición del biogás .....	25
6. Resultados .....	27
6.1. Resultados analítica línea de agua .....	30
6.2. Resultado analítica línea de fango .....	38
6.3. Resultado analítica de digestión .....	52

6.4. Resultado analítica de nutrientes.....	58
6.5. Resumen de los resultados.....	59
7. Diseño de las instalaciones.....	61
7.1. Diseño de la línea de fango .....	61
7.2. Diseño de la línea de biogás .....	67
8. Estudio de rentabilidad de producción de energía eléctrica .....	71
9. Conclusiones.....	73
10. Bibliografía .....	75

**DOCUMENTO II: PRESUPUESTO.**

1. Presupuestos parciales.....	79
2. Presupuesto de mano de obra .....	81
3. Presupuesto por ejecución de material .....	82
4. Presupuesto de ejecución por contrata .....	82
5. Presupuesto total .....	82

**DOCUMENTO III: PLANOS.**

Diagrama de flujo de la línea de fango .....	85
Diagrama de flujo de la línea de biogás.....	87
Emplazamiento .....	89

**DOCUMENTO III: ANEXOS.**

Anexo 1: Representaciones de los parámetros medidos en los distintos puntos de la EDAR .....	93
Anexo 2: Cálculos complementarios.....	115

# **DOCUMENTO I: MEMORIA.**

*Diseño de un digestor de fango anaerobio con producción de biogás. Estudio de cogeneración.*

## **1. JUSTIFICACIÓN.**

La depuración de aguas residuales urbanas consiste en la eliminación, mediante procesos químicos, físicos y biológicos, de la mayor parte de la contaminación, tanto disuelta como en suspensión de dichas aguas. Como consecuencia de la aplicación de los procesos de depuración se obtiene un residuo en forma de semisólido denominado fango o lodo, el cual debe de ser tratado previamente a su vertido a cause. Los fangos representan una fuente de nutrientes y materia orgánica, lo que supone un gran recurso de materia biodegradable que hace que sea apto para ser utilizado en diversos procesos biotecnológicos con el fin de su aprovechamiento, como es el caso de la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia en estaciones depuradoras de aguas residuales.

El biogás producido representa una fuente energética que puede ser utilizada con varios propósitos, como generar suficiente electricidad para suministrar a la red, hasta el autoabastecimiento de la depuradora, consiguiendo así un considerable ahorro energético y fomentando el uso de energías renovables.

Así, con este Trabajo de Fin de Grado se pretende diseñar un digestor anaerobio de una planta depuradora de aguas residuales urbanas con producción de biogás.

Además, la elaboración de este trabajo representa la última etapa de formación del graduado en Ingeniería Química, permitiendo demostrar en un proyecto original que se ha alcanzado un nivel adecuado en las habilidades propias de la profesión de Ingeniero Químico y adquirido así, las múltiples competencias propias de la titulación, y en el caso particular de este TFG:

- Aplicar conocimientos para la realización de un trabajo individual que deberá ser defendido oralmente ante un tribunal.
- Proponer el diseño de equipos y procesos específicos de la Industria Química.
- Saber gestionar la información proveniente de diversas fuentes y clasificar recursos bibliográficos.

*Diseño de un digestor de fango anaerobio con producción de biogás. Estudio de cogeneración.*

## **2. OBJETIVOS.**

El objetivo fundamental del presente Trabajo Fin de Grado es el diseño de un digestor anaerobio con producción de biogás de la EDAR Alzira-Carcaixent.

Para ello, se diseñará previamente las instalaciones necesarias para el tratado del fango antes de la alimentación de dicho digestor, como es el proceso de espesamiento y mezclado de fango. A continuación, se procederá al diseño del digestor anaerobio y las instalaciones necesarias para la producción de biogás, como es el gasómetro y el motor de cogeneración.

Además, tras realizar el diseño de las instalaciones, se realizará un estudio económico sobre el autoabastecimiento de energía a través de la cogeneración con biogás.

*Diseño de un digestor de fango anaerobio con producción de biogás. Estudio de cogeneración.*



### **3. ANTECEDENTES.**

La actividad humana genera inevitablemente residuos que, directa o indirectamente, llegan a las fuentes naturales de agua, hecho que se ve reflejado en la modificación de sus características fisicoquímicas de partida y, por tanto, en su contaminación y toxicidad. Este tipo de aguas recibe el nombre de aguas residuales.

Si dichas aguas son vertidas sin una previa depuración pueden causar grandes daños ambientales, ya que una sobrecarga de materia orgánica a los cauces de los ríos supone:

- Aparición de fangos y flotantes, lo que conlleva desagradable impacto visual y desprendimiento de malos olores.
- Agotamiento del contenido de oxígeno presente en las aguas, debido a la descomposición de la materia orgánica, afectando así a la vida acuática.
- Aporte excesivo de nutrientes causantes del crecimiento descontrolado de algas y otras plantas acuáticas, las cuales pueden impedir el empleo de estas aguas para el uso doméstico.
- Daño a la salud pública, ya que se fomenta la propagación de organismos patógenos para el ser humano.

Por estas razones, es imprescindible la depuración de las aguas residuales previa a su vertido. De esta tarea se ocupan las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), las cuales eliminan una elevada proporción de los contaminantes presentes en las aguas residuales, vertiendo efluentes depurados que pueden ser asimilados de forma natural por los cauces receptores. Esta tarea se encuentra regulada por la Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas, en la cual se encuentran los requisitos necesarios para el vertido de las aguas de una EDAR.

#### **3.1. ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES (EDAR)**

El objetivo genérico de una EDAR es conseguir a partir de aguas residuales y mediante diferentes procesos físicos, químicos y biológicos, un efluente con mejores características, cumpliendo ciertos parámetros normalizados.

##### **3.1.1. Recogida y conducción.**

La recogida y conducción de las aguas residuales se realiza a través de una compleja red de tuberías, por las cuales las aguas pueden fluir por gravedad o por acción de un bombeo.

Normalmente, los sistemas de recogida son unitarios, recolectando así las aguas pluviales junto a las residuales. Con el objetivo de que la estación no reciba más caudal del proyectado, en los colectores de llegada a la EDAR se instalan aliviaderos, que permiten derivar los excesos de caudal.

### 3.1.2. Pretratamiento y tratamiento primario.

El primer proceso por el cual pasa el agua residual de una EDAR se denomina pretratamiento, el cual consiste en eliminar sólidos gruesos, arenas y aceites. Esto se consigue por desbaste, tamizado, desarenado y desengrasado, respectivamente.

A continuación, se procede a la eliminación de aquellos sólidos en suspensión que no se ha conseguido con el pretratamiento. Esto se realiza por decantación primaria en el denominado tratamiento primario.

### 3.1.3. Tratamiento secundario.

El Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, define tratamiento secundario como “El tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso que incluya un tratamiento biológico con sedimentación secundaria u otro proceso, en el que se representen los requisitos que se establecen reglamentariamente”. Para ello, se recurre a bacterias dentro de grandes depósitos, agitados como ayuda de la oxigenación del agua, que se encargan de convertir la materia orgánica disuelta en sus componentes minerales, separándose posteriormente por decantación.

Por lo tanto, el tratamiento secundario está compuesto por una fase biológica y una decantación secundaria.

### 3.1.4. Línea de fangos.

Dentro de una EDAR se puede distinguir fácilmente dos líneas de flujos diferentes, las constituidas por el agua a depurar, descritas en los apartados anteriores, y la de fangos que se obtiene como resultado de la depuración de la primera. Dichas líneas de flujo se pueden observar en el siguiente diagrama de la Figura 1.

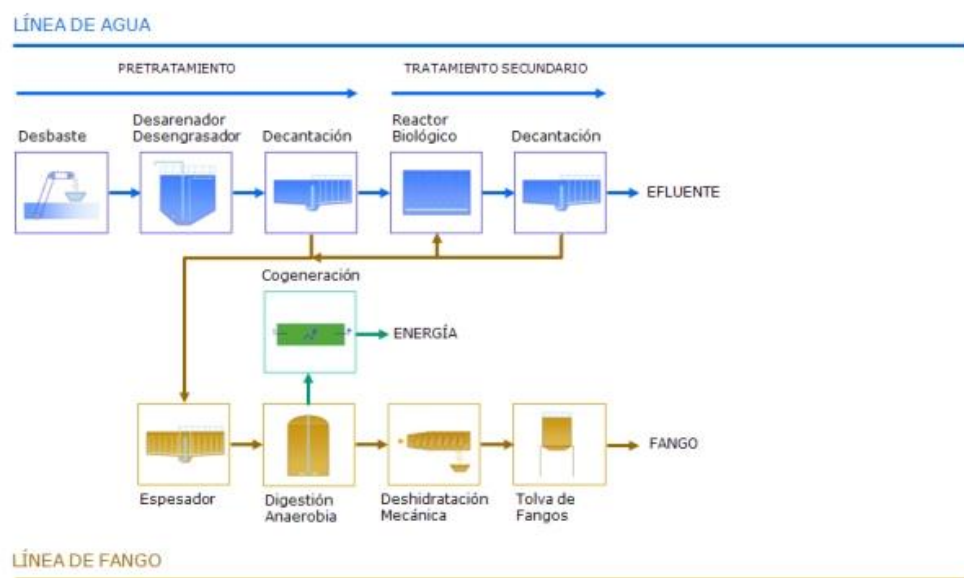


Figura 1. Diagrama de las líneas de flujos de agua y fangos de una EDAR. Fuente: EPSAR.

Esta línea se obtiene como subproducto en los diferentes procesos para la depuración de las aguas residuales. Debido al contenido de diferentes contaminantes y microorganismos que residen en ellas, es necesario un tratamiento específico, en el cual se puede realizar un aprovechamiento energético tal y como se va a estudiar en este proyecto.

La línea de fangos empieza tras cada una de las decantaciones, de las cuales se extraen los fangos sedimentados y se espesan como primer proceso de tratamiento. En éste, se incrementa la concentración del fango con la eliminación de la parte de agua que éste contiene.

Una vez espesado, el fango es estabilizado reduciendo la fracción biodegradable presente en ellos, evitando así su putrefacción. Este proceso puede realizarse mediante digestión aerobia o anaerobia, estabilización química (elevación del pH por adición de cal); o por tratamiento térmico. Este proyecto se enfocará en el proceso de estabilización mediante digestión anaerobia, el cual será explicado con más detalle a continuación, en el punto siguiente.

Por último, se deshidrata el fango final, transformándolos en sólidos fácilmente manejables y transportables. Este último proceso se puede llevar a cabo por centrifugación, filtro banda o térmico. El fango resultante es almacenado en silos para una posterior evacuación, la cual suele estar destinada al uso como abono en campos agrícolas.

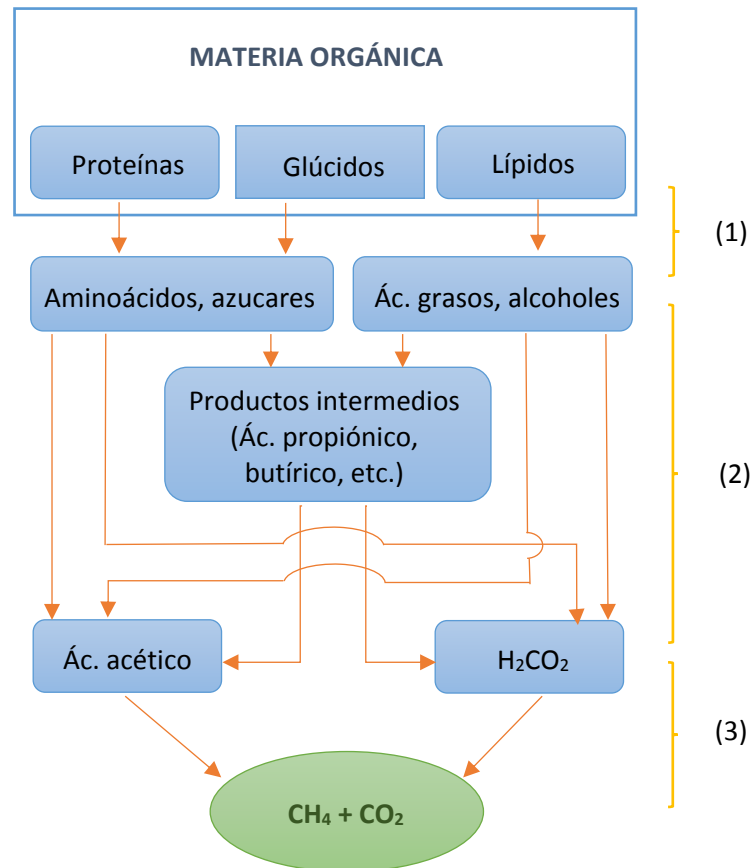
El fango pueden ser aplicados en los suelos agrícolas conforme a lo establecido por el Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario, incinerados en instalaciones de incineración de residuos o coincinerados en cementeras conforme al Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación, y depositados en vertederos siempre que cumplan las condiciones que se establecen en el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

Según datos del Registro Nacional de Lodos, el fango como abono agrícola es el modo más reutilizado (aproximadamente el 80% de los generados). Del mismo modo, se ha logrado reducir en gran medida el depósito en vertedero (aproximadamente el 8% actualmente), mientras que la incineración va creciendo (en torno a un 4%). Otro destino de menor importancia cuantitativa es el uso de los lodos en suelos no agrícolas.

### **3.2. DIGESTIÓN ANAEROBIA DE FANGOS.**

La digestión anaerobia, tal y como se menciona en el apartado anterior, forma parte del proceso de estabilización de fangos, el cual se realiza mediante proceso biológico. Dicho proceso consiste en la degradación de materia orgánica por acción de microorganismos en ausencia de oxígeno, creando una mezcla gaseosa y una suspensión acuosa de materiales sólidos degradados juntos con nitrógeno, fósforo y otros elementos minerales que se encuentran presentes en el fango inicial.

### 3.2.1. Fases de la digestión anaerobia.



**Figura 2. Esquema de las fases del proceso de la digestión anaerobia. (1) Hidrólisis, (2) Acidogénesis, (3) Metanogénesis.**

El proceso engloba diferentes etapas en las que intervienen diversas poblaciones de bacterias, tal y como se puede observar en el esquema de la Figura 2.

- Hidrólisis de la materia orgánica es la fase en la cual los compuestos complejos se transforman en moléculas solubles y degradables.
- Acidogénesis consiste en la transformación de los compuestos, provenientes de la hidrólisis, en ácidos de cadenas más cortas. A su vez, éstos son transformados en ácido acético, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>.
- Por último, en la metanogénesis las bacterias convierten el ácido acético, el H<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub> en metano.

### 3.2.2. Factores que afectan al proceso.

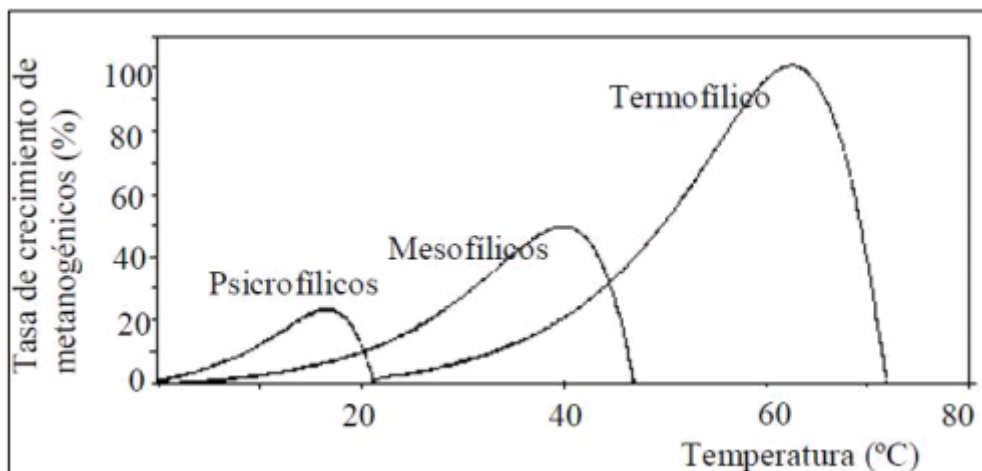
Existen diversos factores que pueden afectar al proceso de digestión anaerobia. Sin embargo, la mayoría pueden ser controlados de manera que el proceso se lleve a cabo de la forma más óptima posible.

- Microorganismos: de los grupos bacterianos encargados del proceso de digestión los más importantes son los encargados de la producción de metano, denominadas bacterias

metanógenas. La característica principal de dicho grupo de microorganismo es que son estrictamente anaerobios, afectando gravemente a su crecimiento y multiplicación una pequeña cantidad de oxígeno. Por otro lado, son de crecimiento lento, el cual depende de la temperatura. Por último, los microorganismos son sensibles al pH, siendo su mejor intervalo entre 6,5 y 7,6, y un valor óptimo de 7.

- Substrato: se denomina así a la comida de las bacterias, es decir, la materia orgánica presente en el fango que van a digerir. Si el fango tiene un alto contenido en materia orgánica compleja se debe decidir sobre la concentración de sólidos en el fango de alimentación al digestor y la frecuencia de alimentación.
- Temperatura: la velocidad de reacción del proceso de digestión depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos que, a su vez, como se ha mencionado anteriormente, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta el crecimiento de los microorganismos por lo tanto acelera el proceso de digestión, con lo conlleva una mayor producción de biogás.

Existen tres rangos de temperaturas a los cuales pueden trabajar los microorganismos anaerobios: rango psicrófilo (por debajo de 25 °C), rango mesófilo (entre 25 y 45 °C) y rango termófilo (entre 45 y 65 °C). Cada rango tiene a su vez una temperatura óptima de trabajo donde la velocidad de crecimiento de los microorganismos alcanza su máxima, tal y como se puede observar en el gráfico de la Figura 3.



**Figura 3. Gráfica representativa del crecimiento bacteriano según el rango de temperaturas.**

Por lo tanto, las características del fango, así como carga orgánica, pH, sólidos en suspensión, etc., y las condiciones a las que deben encontrarse los microorganismos en el reactor, son factores a tener en cuenta a la hora del diseño del mismo.

### 3.3. BIOGÁS.

La mezcla gaseosa producida en la digestión anaerobia del fango recibe el nombre de biogás debido a que se obtiene mediante un proceso biológico. Además, tiene un alto contenido en metano, por lo que es susceptible de un aprovechamiento energético mediante su combustión en motores, en turbinas o en calderas.

#### 3.3.1. Características generales.

El biogás está compuesto, fundamentalmente, por metano (50-70 % CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (30-50% CO<sub>2</sub>), ácido sulfhídrico (<2 % SH<sub>2</sub>) y otros gases (NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> ...). Estos últimos son considerados impurezas por lo que es necesario eliminarlos para su posterior aprovechamiento energético. Por lo tanto, el metano es el principal gas combustible, por lo que la potencia calorífica depende directamente de la concentración de éste, siendo aproximadamente de 5.500 kcal/m<sup>3</sup> con un 60% de CH<sub>4</sub>.

En la Figura 4 se pueden observar algunas equivalencias entre el biogás y otros combustibles.

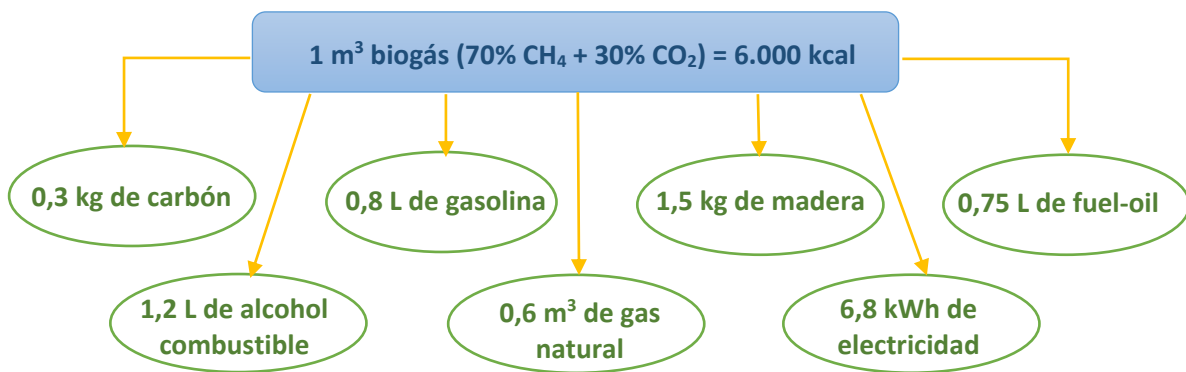


Figura 4. Equivalencias entre Biogás y otros combustibles. Fuente: CIEMAT.

### 3.4. DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES.

Las instalaciones necesarias y más comunes para un correcto funcionamiento del proceso de digestión anaerobia son las descritas a continuación, en la que se tiene en cuenta tanto las instalaciones donde tiene lugar dicho proceso de digestión, así como accesorios de seguridad y depósitos de almacenamientos para el producto final, que en este caso es el biogás y el fango residual resultante.

#### 3.4.1. Digestor.

El digestor es la parte más importante de la instalación, ya que es donde se va a producir el proceso biológico anaerobio. Por ello, debe de ser estanco, con un volumen ocupado por la masa en digestión que corresponda con el tiempo de retención diseñado, y un volumen ocupado por el gas. Es importante también que se tenga en cuenta la formación de espuma para obtener el volumen total, evitando así que la espuma salga por el conducto del gas.

El tipo de digestor más común es el de mezcla completa, que consiste en un cilindro en el cual un sistema de agitación permite homogeneizar la materia a digerir, evitando así que los sólidos sedimenten y se depositen en el fondo del reactor.

Por otro lado, para mantener el digestor a una temperatura óptima de trabajo para las bacterias es necesario que cuente con un sistema de intercambiador de calor, el cual puede estar situado dentro o fuera, siendo mejor este último de cara a labores de mantenimiento.

#### **3.4.2. Depósitos de entrada y salida para materia sólida.**

Los depósitos de entrada y salida son la cámara de mezcla y el depósito tampón, respectivamente.

La cámara de mezcla recibe el flujo de fango proveniente de los espesadores que, a su vez, estos se originan en el decantador primario y en el decantador secundario. En caso de que la digestión se realice con cosustrato, éste se suele añadir en la cámara de mezcla.

Por último, después del proceso de digestión, el fango resultante denominado digestato, es conducido al depósito tampón y a un proceso de deshidratación, para ser almacenado en tolvas para su posterior uso como abono agrícola.

#### **3.4.3. Gasómetro.**

Como el consumo de gas puede ser variable en el tiempo, el gasómetro cumple la función de almacenar el biogás producido y permitir así que se satisfagan los desfases entre consumo y producción de biogás que puede existir en un momento concreto.

#### **3.4.4. Tratamiento del gas.**

El biogás se obtiene saturado de humedad y puede contener concentraciones apreciables de sulfuro de hidrógeno, el cual es corrosivo. Por ello, las tuberías de los circuitos de biogás deben estar provistas de purgadores, para poder eliminar el agua que condensa y evitar que se acumule en el circuito.

Para la eliminación del sulfuro de hidrógeno existen diferentes métodos, siendo uno de ellos las torres de absorción con carbón activo.

#### **3.4.5. Válvula de seguridad y antorcha.**

Cuando el consumo de biogás sea mucho menos que la producción del mismo, se puede provocar una sobreproducción que conllevaría a una sobrepresión en el equipo, por ejemplo, en el gasómetro o el digestor. Por ello, es necesario contar con una válvula de seguridad que sea capaz de abrirse y conducir el biogás sobrante a la antorcha, donde se quemará dicho producto sobrante.

La antorcha es estrictamente necesaria, ya que los gases no pueden ser liberados a la atmósfera sin una previa combustión, debido a que el metano tiene un efecto invernadero 21 veces mayor que el dióxido de carbono.

#### **3.4.6. Motor de cogeneración.**

Por último, el biogás limpio es conducido al motor de cogeneración, el cual en este caso particular es el que abastece de energía eléctrica a la EDAR.

Una de las mayores ventajas del motor de cogeneración es el doble aprovechamiento energético, ya que el agua utilizada como refrigerante de dicho motor se utiliza para el acondicionamiento del fango en los digestores.



#### **4. DEPURACIÓN DE AGUAS DEL MEDITERRÁNEO, S.A.- UTE S Y D AGUAS ALZIRA.**

La empresa Depuración de Aguas del Mediterráneo S.A. (DAM) cuenta con más de veinte años de experiencia en la operación de plantas de tratamiento de agua, y consta de más de cincuenta estaciones depuradoras de aguas residuales, así como plantas de tratamientos de residuos y estaciones de tratamientos de agua potable.

En este caso, los datos utilizados para cumplir con el objetivo del presente proyecto pertenecen a la estación de aguas residuales UTE S Y D AGUAS ALZIRA.



**Imagen 1. EDAR de Alzira-Carcaixent vista desde arriba. Fuente: EPSAR.**

##### **4.1. LOCALIZACIÓN y SITUACIÓN GENERAL.**

El Sistema de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de Alzira-Carcaixent se compone de la EDAR ubicada en Carcaixent. Desde el mes de julio de 2013, la EDAR es explotada por la UTE SAV-DAM y se ocupan de la depuración de aguas residuales provenientes de Alzira, Carcaixent, La Poble Llarga y Villanueva de Castellón, en Valencia.

El sistema de colectores está diferenciado en dos partes, una proveniente de Alzira y Carcaixent, y una segunda de La Poble Llarga y Villanueva de Castellón. Entre ambos colectores se recoge un caudal medio diario de 26.640 m<sup>3</sup>/h, aunque cabe destacar que dicho caudal fue estimado al realizar el proyecto. Sin embargo, en la explotación de la planta el caudal medio de entrada varía según la temporada del año que se encuentre.

#### **4.2. INSTALACIONES.**

Los principales equipos de los cuales consta la planta para la depuración de aguas residuales son los siguientes:

- Edificio de pretratamiento, en el que se encuentra la elevación de agua bruta, el desbaste de sólidos gruesos y finos, las soplantes de desarenado, el clasificador-lavador de arenas y el separador de grasas.
- Dos decantadores primarios.
- Tres reactores biológicos donde se lleva el tratamiento biológico aerobio.
- Dos decantadores secundarios.
- Tres reactores biológicos de digestión, donde se produce biogás.

Es importante destacar que dicho biogás producido es utilizado para producir energía a través de motores de codigestión, con los cuales se ha conseguido una producción de casi el 80% de la energía consumida por la planta en el 2016.

## **5. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS.**

Para el seguimiento de los distintos parámetros que definen el proceso, se han tomado muestra en diferentes puntos de la estación depuradora de aguas residuales de la empresa anteriormente descrita, mediante la incorporación de distintos toma-muestras semiautomáticos. De todas y cada una de las corrientes analizadas, se determinarán los siguientes parámetros de la manera descrita a continuación.

### **5.1. MEDIDA DEL pH.**

El pH es un factor a tener en cuenta a la hora de diseñar y analizar un reactor biológico, ya que afecta directamente a los microorganismos. Para ello, se mide la actividad de los iones de hidrógeno por mediciones potenciométricas, utilizando un electrodo patrón de hidrógeno y otro de referencia.

#### **5.1.1. Procedimiento experimental de medida.**

La medida del pH se realiza con un pH-metro siguiendo los siguientes pasos, de acuerdo a la Norma UNE-EN ISO 10523:2012. *'Calidad del agua. Determinación del pH. (ISO 10523:2008)'*:

- a) Homogeneizar la muestra a medir por agitación. Siempre que sea posible se realiza la determinación del pH en la misma botella de muestreo.
- b) Introducir el electrodo del pH-metro en el interior de la muestra y proceder a con la lectura del pH utilizando el modo de medición por estabilidad.
- c) Aclarar el electrodo de pH y el recipiente de medida con agua destilada o desionizada, y medir la siguiente muestra siguiendo los pasos anteriores.

#### **5.1.2. Interpretación de los resultados.**

La lectura del pH se realiza directamente del pH-metro, el cual vendrá expresado en unidades de pH y con una precisión de dos decimales.

### **5.2. MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD.**

La conductividad, que varía en función de la temperatura, se encuentra relacionada con la concentración de sustancias disueltas y está directamente relacionada con la presencia de sales, ya que la materia orgánica tiene poca conductividad.

#### **5.2.1. Procedimiento experimental de medida.**

La medida de la conductividad se realiza de forma directa con la ayuda de un conductímetro, el cual tiene incorporado un sistema de compensación de temperatura, según lo dicta la Norma UNE-EN 27888:1994. *'Calidad del agua. Determinación de la conductividad eléctrica. (ISO 7888:1985)'*:

- a) Homogeneizar la mezcla a medir por agitación y tomar una muestra en un vaso de precipitado.
- b) Introducir el electrodo del conductímetro en el interior de la muestra y proceder a con la lectura de la conductividad utilizando el modo de medición por estabilidad.

### **5.2.2. Interpretación de los resultados.**

La lectura de la conductividad se realiza directamente del conductímetro, el cual proporciona el valor en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

### **5.3. MEDIDA DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS.**

Se denominan sólidos totales en suspensión (SST) a la fracción de sólidos totales que queda retenida por una membrana filtrante de un tamaño determinado. Dentro de los SS se encuentran los sólidos decantables y los sólidos flotantes.

#### **5.3.1. Procedimiento experimental de medida.**

La medición de los SST se lleva a cabo según la Norma UNE-EN 872:2006. '*Calidad del agua. Determinación de sólidos en suspensión. Método de filtración por filtro de fibra de vidrio*', y los pasos a seguir son los siguientes, utilizando para ello un equipo de vacío y filtros de fibra de vidrio:

- a) Pesar el filtro de vidrio ( $P_0$ ).
- b) Colocar el filtro, con la cara lisa hacia abajo, en el embudo del sistema de filtración y conectar el equipo de vacío.
- c) Agitar la muestra y transferir un volumen ( $V$ ) adecuado a una probeta graduada, realizándolo en un solo paso.
- d) Filtrar la muestra contenida en la probeta.
- e) Enjuagar la probeta con 20 ml de agua destilada y lavar el filtro.
- f) Limpiar la parte interior del embudo del filtro con otros 20 ml de agua destilada.
- g) Cuando la muestra contenga más de 1.000 mg/l de sólidos disueltos, efectuar el lavado posterior de los filtros con tres porciones de 50 ml cada una de agua destilada.
- h) Cuando no quede resto de agua en el filtro, apagar el equipo de vacío y extraer el filtro con unas pinzas provistas de extremos planos.
- i) Colocar el filtro en un soporte de secado e introducirlo en la estufa a  $105\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$  al menos 1 hora.
- j) Sacar el filtro de la estufa y dejarlo enfriar desecador.
- k) Pesar el filtro ( $P_1$ ).

#### **5.3.2. Interpretación de los resultados.**

El contenido de SST filtrable es el expresado en la siguiente Ecuación, Ec. 1:

$$SST \left( \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = \frac{(P_1 - P_0) \cdot 1.000}{V} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde  $P_0$  y  $P_1$  son los pesos en mg obtenidos en la parte experimental, y  $V$  es el volumen en ml de muestra filtrada.

#### **5.4. MEDIDA DE SÓLIDOS TOTALES Y VOLÁTIL.**

Los sólidos suspendidos totales (SST) corresponde a la materia de fango al someter a éste a un proceso de deshidratación. Así mismo, la proporción de dicha SST que está constituida por materia orgánica se lo denomina sólidos volátiles (SSV).

##### **5.4.1. Procedimiento experimental de medida.**

En este caso, el procedimiento experimental de medida se puede dividir en dos partes, según la muestra que se vaya a analizar. Por lo tanto, en el caso del análisis de muestras de aguas, los pasos, según la Norma UNE 77034:2002. '*Calidad del agua. Determinación de los sólidos en suspensión fijos y volátiles.*', son los siguientes:

- a) Calcinar un filtro de vidrio en un horno a 550 °C durante un período mínimo de 30 minutos.
- b) Dejar enfriar el crisol en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente y pesarlo ( $P_0$ ).
- c) Colocar el filtro, con la cara lisa hacia abajo, en el embudo del sistema de filtración y conectar el equipo de vacío.
- d) Agitar la muestra y transferir un volumen ( $V$ ) adecuado a una probeta graduada, realizándolo en un solo paso.
- e) Filtrar la muestra contenida en la probeta.
- f) Enjuagar la probeta con 20 ml de agua destilada y lavar el filtro.
- g) Limpiar la parte interior del embudo del filtro con otros 20 ml de agua destilada.
- h) Cuando la muestra contenga más de 1.000 mg/l de sólidos disueltos, efectuar el lavado posterior de los filtros con tres porciones de 50 ml cada una de agua destilada.
- i) Cuando no quede resto de agua en el filtro, apagar el equipo de vacío y extraer el filtro con unas pinzas provistas de extremos planos.
- j) Colocar el filtro en un soporte de secado e introducirlo en la estufa a 105 °C  $\pm$  2 °C al menos 1 hora.
- k) Sacar el filtro de la estufa y dejarlo enfriar desecador.
- l) Pesar el filtro ( $P_1$ ).
- m) Tomar el filtro resultante de la determinación de SST anterior y calcinarlo en un horno a 550 °C durante 1 hora.
- n) Dejar enfriar en un desecador hasta conseguir un peso constante ( $P_2$ ).

Por otro lado, para el caso de muestras más densas, como es el caso del fango espesado, según la Norma UNE-EN 12880:2001. '*Caracterización de lodos. Determinación de la humedad y del contenido en materia seca.*', los pasos a seguir son los siguientes:

- a) Colocar un crisol en una estufa de secada durante mínimo 30 minutos.
- b) Someter dicho crisol a calcinación a 550 °C durante un período mínimo de 30 minutos.
- c) Dejar enfriar el crisol en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente y pesarlo ( $P_0$ ).
- d) Colocar una cantidad apropiada de muestra de fango en el crisol y volverlo a pesar ( $P_1$ ).

- e) Colocar el crisol que contiene la muestra de fango en una estufa de secado a 105 °C, aproximadamente 24 horas.
- f) Dejar enfriar en un desecador hasta obtener un peso aproximadamente constante ( $P_2$ ).
- g) Calcinar la muestra colocando el crisol en un horno a 550 °C durante 1 horas.
- h) Dejar enfriar en un desecador hasta obtener un peso aproximadamente constante ( $P_3$ ).

#### **5.4.2. Interpretación de los resultados.**

Para el cálculo de SST y SSV, proveniente tanto de muestra líquida como de fangos más densos, se utilizan las expresiones de la Ec. 2 y Ec. 3, respectivamente.

$$SST (\%) = \frac{P_2 - P_0}{P_1 - P_0} \cdot 100 \quad \text{Ec. 2}$$

$$SSV (\%) = \frac{P_2 - P_3}{P_2 - P_0} \cdot 100 \quad \text{Ec. 3}$$

Donde  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$  son los obtenidos en cada proceso experimental.

#### **5.5. MEDIDA DE ALCALINIDAD TOTAL Y ACIDEZ VOLÁTIL.**

La estabilidad de la cantidad tamponante del digestor viene dada por la alcalinidad. Los valores normales de alcalinidad en el interior de un digestor varían entre 1.500 y 5.000 mg  $\text{CaCO}_3$  /l, siendo el rango más óptimo entre 2.000 y 2.500 mg  $\text{CaCO}_3$  /l. De esta forma, cuanto mayor sea la alcalinidad, mayor será la capacidad de los microorganismos a resistir cambios de pH.

Por otro lado, para calcular AGV hay que calcular previamente los ácidos volátiles (AV), los cuales son producidos en la fase de acidogénesis del proceso de digestión anaerobia.

Los valores adecuados en condiciones normales para ácidos grasos volátiles son entre 100 y 300 mg/l; por lo que AGV debe de estar por debajo de 0,25.

##### **5.5.1. Procedimiento experimental de medida.**

El procedimiento que se lleva a cabo para medir el TAC y los AV es el siguiente:

- a) Introducir 12,5 mL de fango homogeneizado en el tubo de centrifuga.
- b) Introducir el tubo en la centrifuga durante 15 minutos a velocidad alta.
- c) Recoger el sobrenadante del tubo, colocándolo en un vaso precipitado.
- d) Introducir agua destilada en el tubo para que la materia decantada del tubo quede en suspensión y verterlo en una probeta sin que queden restos en el tubo.
- e) Enrasar la probeta hasta 25 mL con agua destilada y homogeneizar la mezcla.
- f) Introducir 12,5 mL de la mezcla anterior en un tubo de centrifuga.
- g) Introducir el tubo nuevamente 15 minutos en la centrifuga.

- h) Realizar del paso c) hasta el paso g) tres veces, recogiendo siempre el sobrenadante en el mismo vaso precipitado.
- i) Medir el pH inicial de los sobrenadantes recogidos, manteniendo el líquido en agitación continua.
- j) Sin dejar de agitar, añadir ácido sulfúrico 0,1 N hasta alcanzar pH = 4 y anotar el volumen de reactivo consumido ( $V_1$ ).
- k) Sin dejar de agitar, añadir ácido sulfúrico 0,1 N hasta alcanzar pH = 3,5 y anotar el volumen de reactivo consumido ( $V_2$ ).
- l) Calentar la mezcla resultante, manteniéndola 3 minutos en ebullición.
- m) Enfriar a temperatura ambiente.
- n) Agitando, añadir hidróxido sódico 0,1 N hasta alcanzar pH = 4 y anotar el volumen de reactivo consumido ( $V_3$ ).
- o) Sin dejar de agitar, añadir hidróxido sódico 0,1 N hasta alcanzar pH = 7 y anotar el volumen de reactivo consumido ( $V_4$ ).

Los pasos son realizados para cada muestra de fango a los que se quiera determinar dichos valores, teniendo así el mismo número de tubos de centrifuga tanto como número de muestras a analizar.

### **5.5.2. Interpretación de los resultados.**

Una vez realizado el proceso experimental, se hace uso de la Ec. 4 y la Ec. 5 para la obtención del TAC y AV, respectivamente.

$$TAC \left( \frac{mg \text{ CaCO}_3}{l} \right) = V_1 \cdot 200 \quad \text{Ec. 4}$$

$$AV \left( \frac{mg \text{ CaCO}_3}{l} \right) = (V_3 - V_2) \cdot 200 \quad \text{Ec. 5}$$

Donde  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$  son los volúmenes de los reactivos utilizados en la parte experimental de la medida.

Por último, se divide entre ambos para obtener la AGV, que es un parámetro adimensional, tal y como muestra la Ec. 6.

$$AGV = \frac{AV}{TAC} \quad \text{Ec. 6}$$

## **5.6. MEDIDA DE SÓLIDOS DECANTABLES.**

Los sólidos decantables se definen como aquellos que, encontrándose dispersos en el agua, caen por acción de la gravedad al fondo de un recipiente, en este caso de forma cónica en el transcurso de un período de 60 minutos, y constituyen una medida aproximada de la cantidad de fango que se obtendrá de la decantación primaria del agua residual.

### **5.6.1. Procedimiento experimental de medida.**

Para la medición de la V-60 los pasos son los siguientes, según la Norma UNE 77032:2015. '*Calidad del agua. Determinación de sólidos decantables.*':

- a) Homogeneizar la muestra a medir por agitación o invirtiendo varias veces el recipiente donde se encuentre dicha muestra.
- b) Introducir un litro de muestra en un cono Imhoff como el que se muestra en la Figura 5.
- c) Dejarlo reposar durante 45 minutos, al cabo de los cuales, se frota o rasca suavemente la pared interior del cono con una varilla, tratando de desprender las sustancias que estén adheridas al vidrio.
- d) Dejar en reposo aproximadamente 15 minutos y anotar el volumen de materia decantada en mililitros, por lectura directa en la escala del cono.



**Figura 5. Cono Imhoff utilizada para la medición de los sólidos decantables de aguas residuales.**

### **5.6.2. Interpretación de los resultados.**

El resultado final de la medición de los sólidos decantable se realiza con la observación de los ml de sólidos decantados durante los 60 minutos del proceso experimental. Por lo tanto, la V-60 vendrá expresada en ml de materia decantada por litro de agua residual.

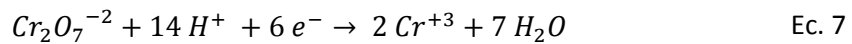


## **5.7. MEDIDA DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO.**

La DQO es uno de los parámetros a los cuales se recurre para saber el grado de contaminación de las aguas residuales. Así, cuanto mayor sea la DQO mayor será su grado de contaminación.

Este parámetro determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua residual. El valor resultante se expresa en mg de O<sub>2</sub> por litro de agua residual, y es un valor aproximado ya que la materia inorgánica presente es susceptible a ser oxidada, lo que se ve reflejado en el resultado.

La materia orgánica se puede oxidar en caliente con dicromato (Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>-2</sup>), lo cual constituye un método analítico habitual para la determinación de la DQO, la cual se puede definir como la cantidad de O<sub>2</sub> químicamente equivalente al Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>-2</sup> consumido en este proceso. Dicha equivalencia queda establecida a partir de las reacciones de reducción-oxidación correspondientes:



Como se puede observar en la Ec. 7 y Ec. 8, cada Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>-2</sup> consume 6 electrones al reducirse, mientras cada molécula de oxígeno consume 4 electrones. Por lo tanto, 1 mol de Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>-2</sup> consumido equivale a 1,5 moles de O<sub>2</sub>.

Ahora bien, para agilizar la medición de la DQO existen kits de medidas con los reactivos ya preparados, los cuales contienen además sulfato de plata como catalizador.

### **5.7.1. Procedimiento experimental de medida.**

El kit de medida utilizado fue de la casa comercial Hach, el cual consta de diferentes rangos de DQO, lo que hay que tener en cuenta según la procedencia de la muestra que se quiere determinar. Sin embargo, independientemente del rango, el procedimiento experimental general es el siguiente, el cual se encuentra basado en la Norma UNE 77004:2002. '*Calidad del agua. Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO). Método del dicromato.*':

- a) Escoger el rango preciso correspondiente a la muestra que se vaya a analizar.
- b) Agitar una cubeta del kit Hach LCK para homogeneizar los reactivos.
- c) Pipetear el volumen de muestra indicado en la caja del kit Hach LCK correspondiente al rango, e introducirlo en la cubeta.
- d) Calentar la cubeta en un termostato a  $148 \pm 5$  °C durante dos horas.
- e) Agitar la cubeta y dejar enfriar fuera del termostato, a temperatura ambiente.
- f) Limpiar el exterior de la cubeta e introducirla en el espectrofotómetro.

### **5.7.2. Interpretación de los resultados.**

La medida de la DQO, la cual viene expresada en mg O<sub>2</sub>/l, se realiza directamente del espectrofotómetro.

### **5.8. MEDIDA DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO.**

La DBO se define como la cantidad de oxígeno consumido tras 5 días en conservación, a 20 °C y en la oscuridad, principalmente para asegurar su degradación por vía biológica.

#### **5.8.1. Procedimiento experimental de medida.**

Para la medición de la DBO<sub>5</sub> se utiliza un diferencial de presión Oxitop, con el cual se calcula la cantidad de oxígeno consumido en una muestra determinada después de los 5 días de incubación. Para ello, el procedimiento experimental a realizar es el descrito a continuación.

- a) Determinar el volumen de muestra necesario según el valor de DQO de dicha muestra, como viene indicado en el manual del instrumento de medida Oxitop.
- b) Medir el volumen de muestra determinado y colocarlo en una botella de medición de DBO, como se puede observar en la Figura 6.
- c) Introducir un imán para mantener posteriormente la muestra en agitación.
- d) Colocar unas gotas de inhibidor de nitrificación, el cual está asociado al volumen de muestra analizado y se encuentra indicado en el manual de medida Oxitop.
- e) Colocar en el cuello de la botella una capsula de goma sostenedora de sosa.
- f) Introducir 3-4 gotas de sosa en la capsula de goma y colocar el cabezal del Oxitop, comprobando que quede bien sellado.
- g) Resetear el Oxitop presionando durante al menos 3 segundo los dos botones.
- h) Colocar la botella en la incubadora durante 5 días.



**Figura 6. Botella de medición de DBO<sub>5</sub> con cabezal Oxitop. Fuente: Catálogo Oxitop.**

### **5.8.2. Interpretación de los resultados.**

La lectura de la DBO<sub>5</sub>, expresada en mg O<sub>2</sub>/l, se realiza directamente del instrumento de medida Oxitop, y para ello se presiona el botón 'S'.

## **5.9. MEDIDA DEL NITRÓGENO AMONIACAL.**

En las aguas residuales, el nitrógeno se encuentra presente en forma de urea y compuestos proteicos, que pasan a forma amoniacal (N-NH<sub>4</sub>) por descomposición bacteriana.

### **5.9.1. Procedimiento experimental de medida.**

Para la determinación de N-NH<sub>4</sub> se utiliza el kit de medida perteneciente a la casa comercial Hach, el cual varía los volúmenes de reactivos y muestra a utilizar según el rango de medida que se vaya a determinar. Sin embargo, independientemente del dicho rango, el procedimiento experimental siempre es el mismo, el cual se explica a continuación.

- a) Retirar el zip del tapón de la cubeta de análisis e introducir un volumen determinado de muestra en dicha cubeta, según el rango de medida y el cual viene determinado en las instrucciones del kit de medida.
- b) Tapar la cubeta dejando la parte del tapón que cubría el zip mirando hacia el interior de la misma.
- c) Agitar manualmente y dejar reposar 15 minutos.
- d) Limpiar el exterior de la cubeta y proceder a la lectura en un espectrofotómetro.

### **5.9.2. Interpretación de los resultados.**

La medida del N-NH<sub>4</sub>, la cual viene expresada en mg N-NH<sub>4</sub>/l, se realiza directamente del espectrofotómetro.

## **5.10. MEDIDA DEL NITRÓGENO NÍTRICO.**

A medida que el agua se estabiliza, por oxidación bacteriana en medio aerobio se generan nitritos y posteriormente nitratos. El predominio de la forma de nitrato en un agua residual es un fiel indicador de que el residuo se ha estabilizado con respecto a la demanda de oxígeno. Por esta razón, es importante la determinación de la concentración de nitrógeno nítrico (N-NO<sub>3</sub>).

### **5.10.1. Procedimiento experimental de medida.**

Para determinar el N-NO<sub>3</sub> se vuelve a utilizar un kit de medida de la casa comercial Hach, con diferentes rangos de valores y cuyo procedimiento experimental es el siguiente:

- a) Introducir un volumen determinado, dependiendo del rango y tal y como viene indicado en el kit de medida, de muestra en una cubeta de análisis.
- b) Agitar manualmente y dejar reposar durante 15 minutos.

- c) Limpiar el exterior de la cubeta y proceder a la lectura en un espectrofotómetro.

#### **5.10.2. Interpretación de los resultados.**

La medida del N-NO<sub>3</sub>, la cual viene expresada en mg N-NO<sub>3</sub>/l, se realiza directamente del espectrofotómetro.

### **5.11. MEDIDA DEL NITRÓGENO TOTAL.**

Es importante la determinación del nitrógeno total (NT) para su control ya que puede provocar un crecimiento excesivo de algas en las aguas receptoras.

#### **5.11.1. Procedimiento experimental de medida.**

Para la medición del NT se utiliza un kit de medida de la casa comercial Hach, el cual, como se ha explicado anteriormente, consta de diferentes rangos, lo que hay que tener en cuenta según la procedencia de la muestra que se quiere determinar. Por lo tanto, el procedimiento experimental es el siguiente:

- a) Introducir en una cubeta de plástico un volumen determinado de muestra y un volumen de reactivo A, ambos volúmenes dependen del rango de medida y se encuentran indicados en las instrucciones de medida del kit Hach.
- b) Introducir una capsula del reactivo B y cronometrar 15 minutos.
- c) Calentar la cubeta en un termostato a  $100 \pm 5$  °C durante 1 hora.
- d) Enfriar hasta temperatura ambiente e introducir una capsula del reactivo C.
- e) Agitar manualmente hasta que se haya disuelto.
- f) Pasar un volumen determinado, según el rango de medida, de la cubeta de plástico a una cubeta de vidrio con reactivos.
- g) Introducir la cantidad adecuada, según el rango de medida, de reactivo D y agitar manualmente.
- h) Dejar reposar 15 minutos, limpiar el exterior de la cubeta y proceder a la lectura en un espectrofotómetro.

#### **5.11.2. Interpretación de los resultados.**

La medida del NT, la cual viene expresada en mg NT/l, se realiza directamente del espectrofotómetro.

### **5.12. MEDIDA DEL FÓSFORO TOTAL.**

El fósforo, al igual que el nitrógeno, es un elemento esencial para el crecimiento biológico. Por ello es importante su determinación y posterior control.

### **5.12.1. Procedimiento experimental de medida.**

El procedimiento experimental de medida del Fósforo Total (PT) se realiza con un kit de medida procedente de la casa comercial Hach, el cual se encuentra adaptado a al procedimiento experimental del Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. Los pasos a seguir son los siguientes:

- a) Retirar el zip del tapón de la cubeta de medida e introducir un volumen determinado de muestra en dicha cubeta, según el rango de media y el cual viene determinado en las instrucciones del kit de medida.
- b) Tapar la cubeta dejando la parte del tapón que cubría el zip mirando hacia el interior de la misma.
- c) Agitar manualmente la cubeta y dejarla reposar 15 minutos.
- d) Introducirla en un termostato a  $100 \pm 5$  °C durante 1 hora.
- e) Dejarla enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente y volver a agitar manualmente.
- f) Introducir un volumen de reactivo B, como viene indicado en las instrucciones del kit de medida.
- g) Cambiar el tapón inicial por uno nuevo que contenga reactivo C.
- h) Agitar manualmente y dejar reposar 10 minutos.
- i) Limpiar el exterior de la cubeta y proceder a la lectura en un espectrofotómetro.

### **5.12.2. Interpretación de los resultados.**

La medida del FT, la cual viene expresada en mg PT/l, se realiza directamente del espectrofotómetro.

### **5.13. MEDIDA DE LA COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS.**

Para la determinación de la composición de biogás se realiza la medición del metano, el dióxido de carbono y el ácido sulfhídrico. Para ello, se utiliza una bomba Gastec y tubos de medición respectivos para cada sustancia, como se puede observar en la Figura 7.



**Figura 7. Bomba Gastec con tubo de medida colocado.**

### **5.13.1. Procedimiento experimental de medida.**

El procedimiento de medida es independiente a la sustancia que se esté determinando, y es el descrito a continuación.

- a) Escoger el tubo de medición correspondiente a la sustancia que se quiera determinar y al rango aproximado de concentración de la misma.
- b) Colocar uno extremo del tubo en el orificio de ruptura '*tip breaker*' y romper la punta realizando palanca con el tubo. Repetir la acción con el otro extremo del tubo.
- c) Colocar el tubo en el extremo de la bomba Gastec, de forma que la flecha azul del tubo de medida marque el sentido del fluido de la muestra a medir.
- d) Colocar la palanca de succión en la posición correcta, de forma que si el tubo de medida indica 1 la palanca de succión tiene que estar en la posición de 100 y si el tubo de medida marca  $\frac{1}{2}$  la palanca de succión tiene que estar en la posición de 50.
- e) Colocar el tubo de medida en el toma muestra correspondiente y succionar hasta llegar al tope de la palanca de succión.
- f) Dejar el tubo en esa posición hasta que el círculo que se encuentra en el extremo de la palanca de succión cambie a color blanco.
- g) Retirar el tubo del toma muestra y realizar la lectura de concentración de sustancia directamente del tubo de medida.

### **5.13.2. Interpretación de los resultados.**

La lectura de la concentración de la sustancia que se haya determinado se realiza directamente del tubo de medida, el cual viene expresado en ppm, mg/l o en %, dependiendo el rango que se tenga que medir.

Para la determinación de la concentración en el tubo de medida, hay que observar que a medida que gas circula por el interior de dicho tubo, éste va cambiando de color, en más o menos medida según la concentración.

## **6. RESULTADOS.**

En este punto se va a presentar, en diferentes gráficas, los resultados de los distintos parámetros explicados en el punto anterior, de los cuales se constan de tres meses consecutivos de análisis: abril, mayo y junio del año 2016.

Para ello, este punto estará dividido en cuatro partes: analítica de la línea de aguas, analítica de nutrientes, analítica de la línea de fangos y analítica de digestión.

Los puntos donde son tomadas las muestras para su posterior análisis se ven reflejados en el diagrama de bloque de la empresa, en la Figura 8, en la cual los puntos y los parámetros que se analizan en cada uno de ellos se explica a continuación y se encuentran resumidos en la Tabla 1.

En primer lugar, en la línea de aguas se mide el pH y la conductividad en la corriente del decantador secundario y en la corriente de salida de los espesadores. Además, se miden los SST, la DQO y la DBO5 en la corriente del decantador primario y secundario, y en la salida de los espesadores.

Por otro lado, en la parte de analítica de nutrientes se mide el NT, el N-NH4 y el PT tanto en el decantador secundario como en la corriente de los esperadores. Sin embargo, el N-NO3 es medido solamente en el decantador secundario.

En cuanto a la analítica de fangos, se mide pH, SST y SSV en todas las corrientes de la línea de fango, cuyos puntos son: fango primario (proveniente de la decantación primaria), fango primario espesado, fango en exceso (proveniente de la decantación secundaria), fango en exceso espesado, fango de la mezcla digestión (corriente de salida de la cámara de mezcla), fango digerido (corriente de salida del depósito tampón); y fango deshidratado.

Por último, en la analítica de digestión se analizan los tres digestores de la planta, digestor A, B y C, y la línea de biogás. Así, en la corriente de salida de cada digestor se mide la SST, SSV, Tª, pH, TAC, AV y AGV.

**Tabla 1. Resumen de los diferentes puntos de análisis.**

<b>Analítica de la línea de agua</b>	
Punto 1 (Entrada)	pH, conductividad, V-60, SST, DQO, DBO5
Punto 2 (Decantación primaria)	SST, DQO, DBO5
Punto 3 (Decantación secundaria)	pH, conductividad, SST, DQO, DBO5
<b>Analítica de nutrientes</b>	
Punto 1 (Entrada)	NT, N-NH <sub>4</sub> , PT
Punto 3 (Decantación secundaria)	NT, N-NH <sub>4</sub> , PT, N-NO <sub>3</sub>
<b>Analítica línea de fangos</b>	
Punto 4 (F. primario)	pH, SST, SSV
Punto 5 (F. primario espesado)	pH, SST, SSV
Punto 6 (F. exceso)	pH, SST, SSV
Punto 7 (F. exceso espesado)	pH, SST, SSV
Punto 8 (F. mezcla digestión)	pH, SST, SSV
Punto 9 (F. Digerido)	pH, SST, SSV
Punto 10 (F. Deshidratado)	pH, SST, SSV
<b>Analítica de digestión</b>	
Punto 11 (Digestor A-B-C)	SST, SSV, T <sup>a</sup> , pH, TAC, AV, AGV
Punto 12 (Biogás producido)	Q, CO <sub>2</sub> , SH <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>
Punto 13 (Biogás de antorcha)	Q
Punto 14 (Biogás de cogeneración)	Q



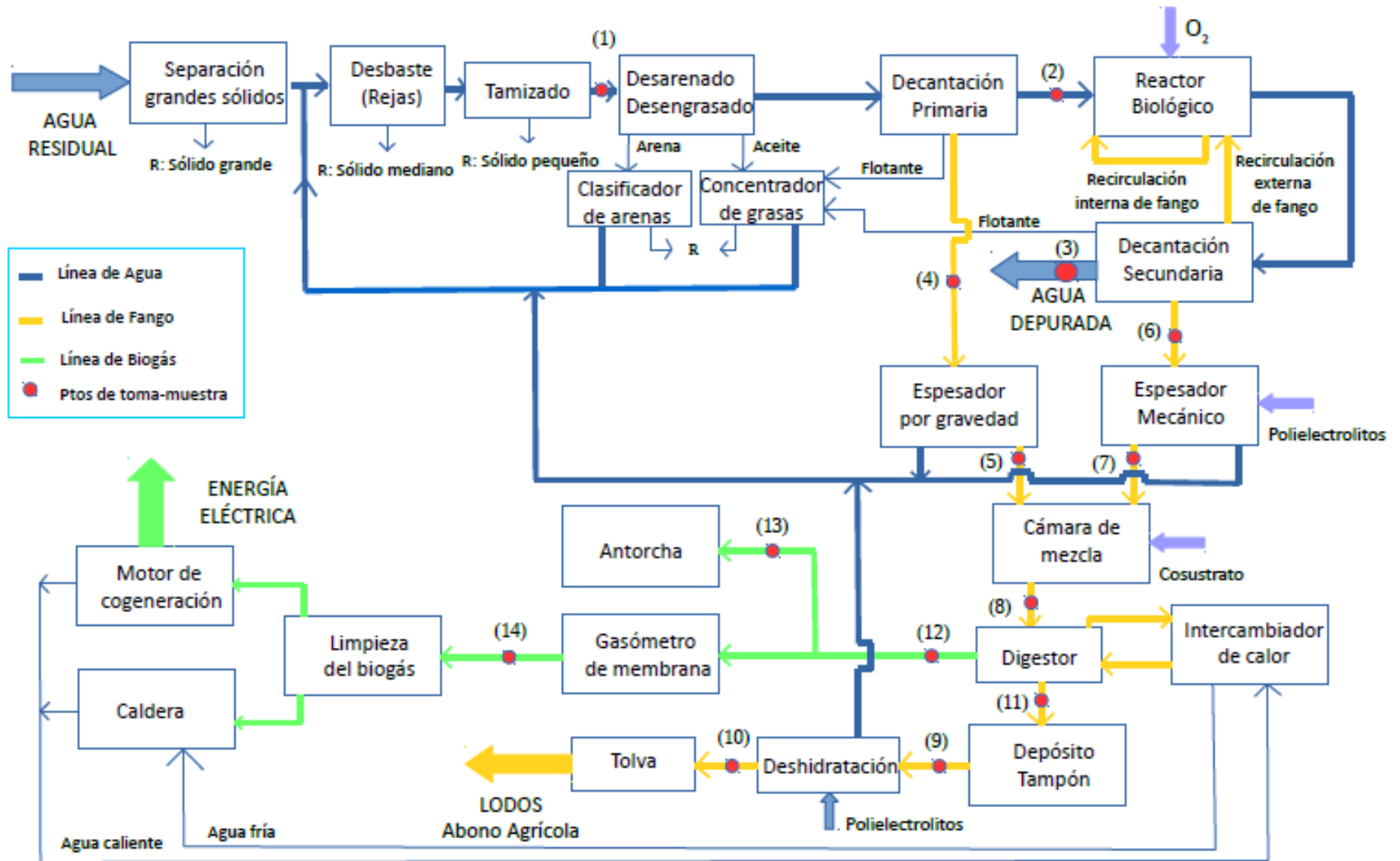


Figura 8. Diagrama de bloque de la planta con los puntos donde se realizan las muestras de análisis.

### 6.1. RESULTADOS ANALÍTICA LINEA DE AGUAS.

Las distintas medidas de los parámetros determinados en la línea de agua se representan, a continuación, con el siguiente orden: pH, conductividad, V-60, SS, DQO, y, por último, DBO5.

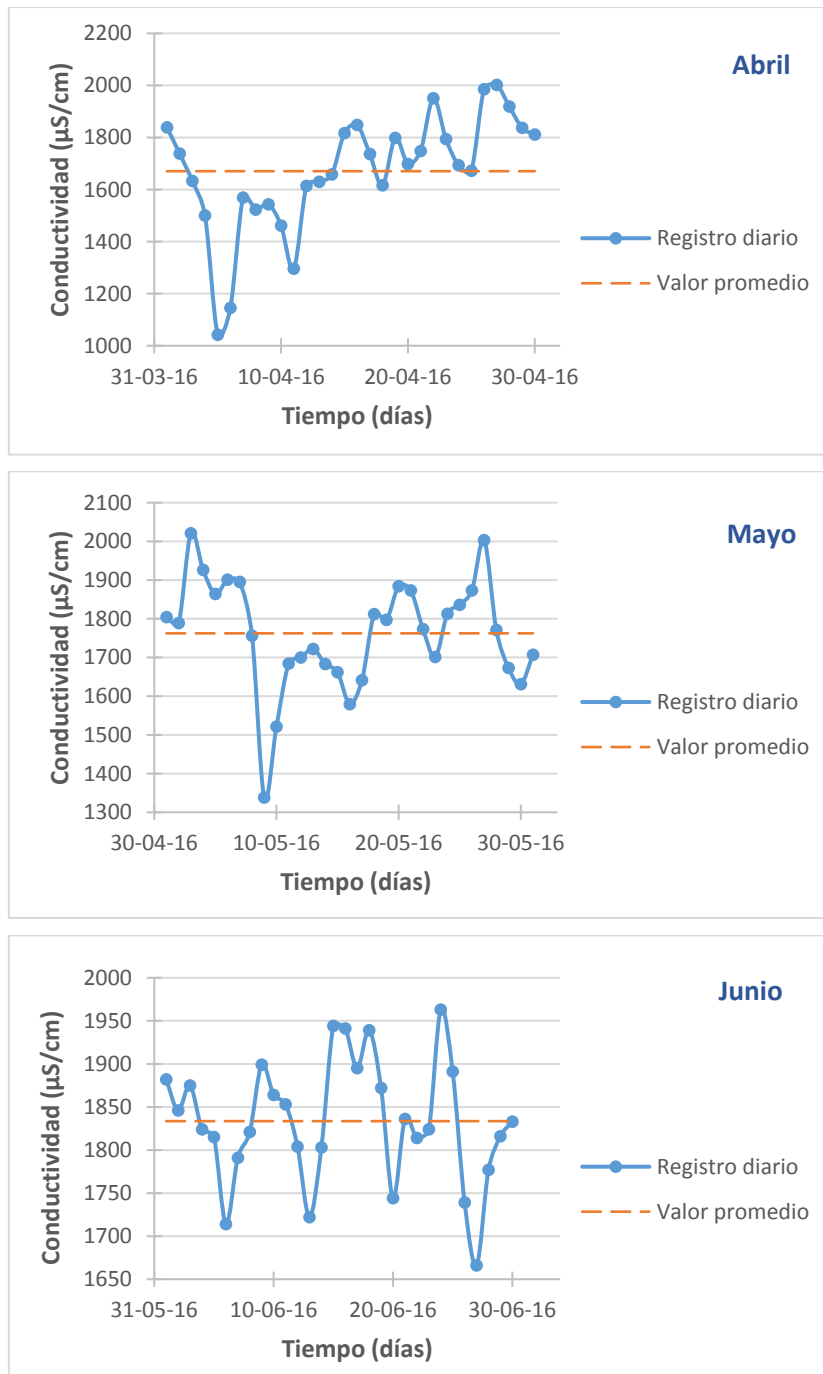
Las representaciones de los parámetros medidos a la entrada, es decir, en el punto 1 correspondiente en el diagrama de flujo, se encuentran en el Anexo 1, ya que éste no es un punto determinante para el diseño y estudio de este proyecto.

#### 6.1.1. Resultados de pH.



Gráfica 2. Analítica de pH en el decantador secundario.

### 6.1.2. Resultados de Conductividad.

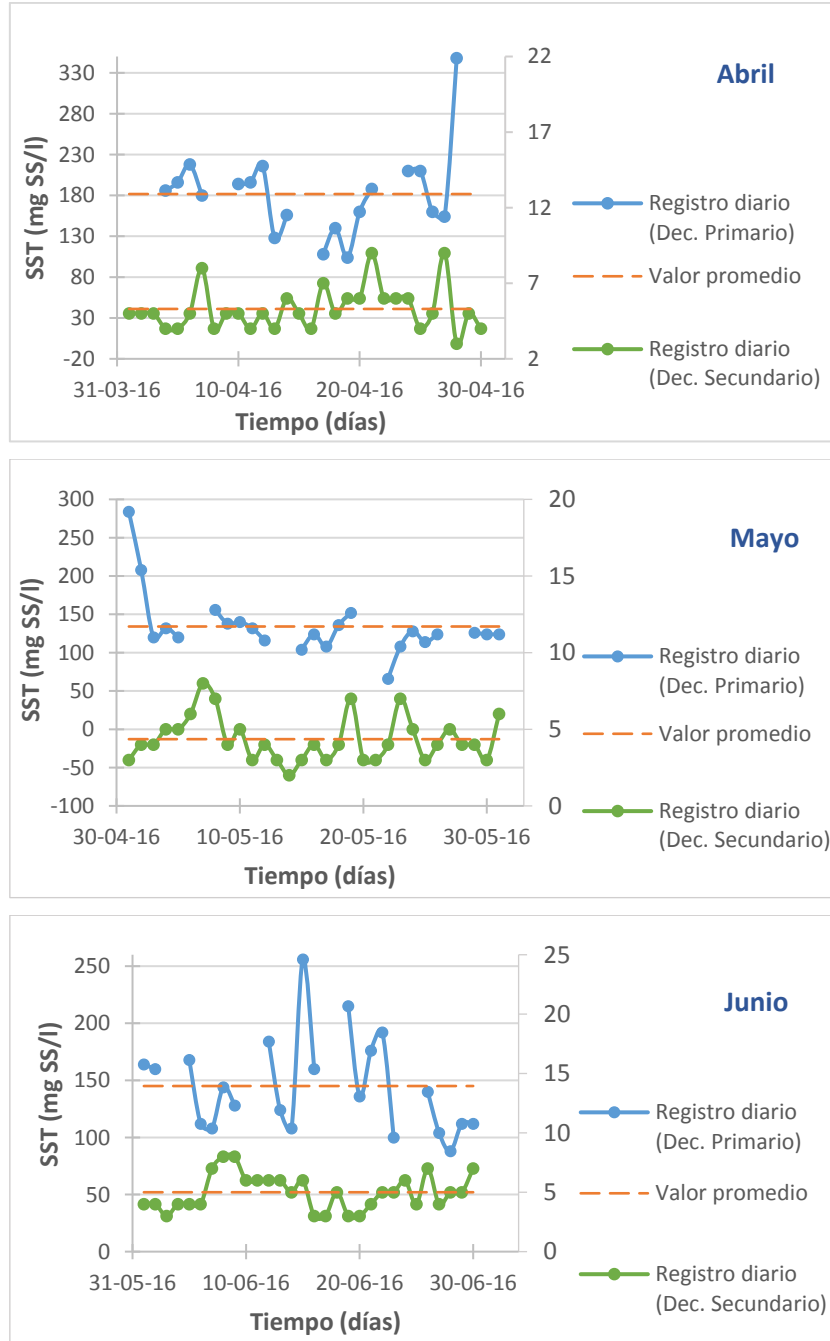


Gráfica 4. Analítica de conductividad en el decantador secundario.

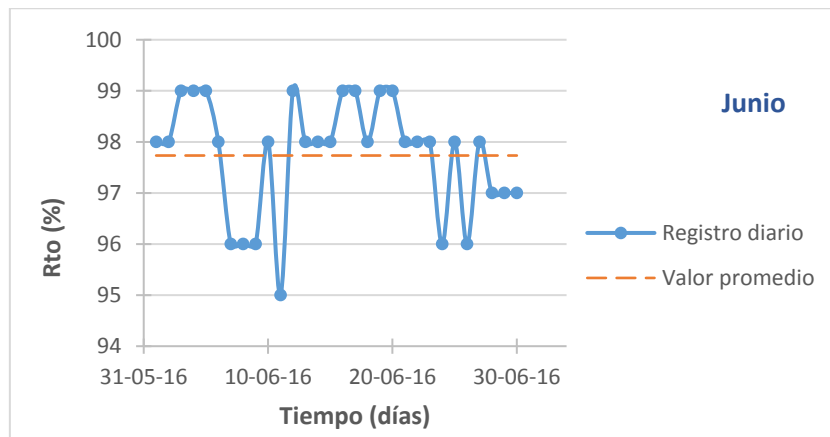
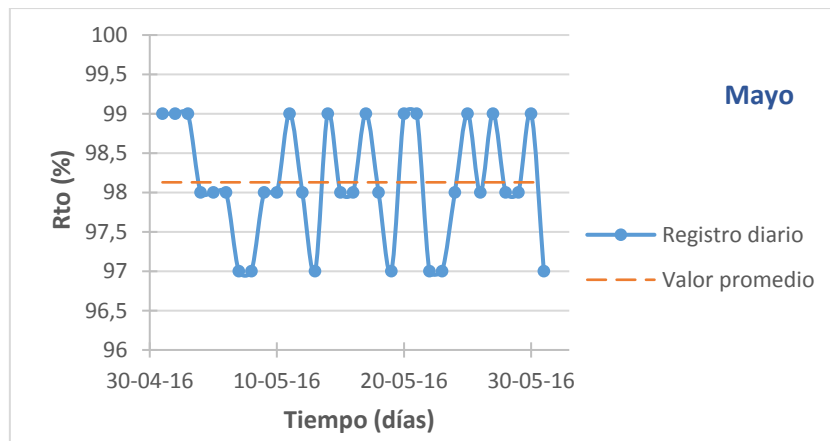
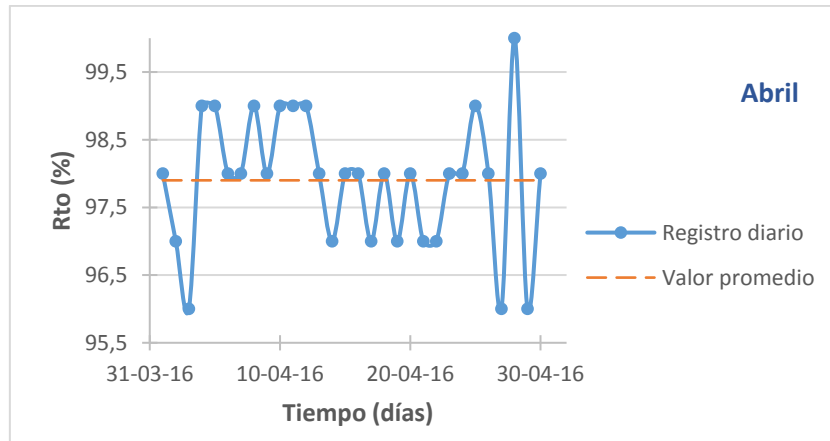
### 6.1.3. Resultados de sólidos decantables.

El parámetro V-60 solo se determina en la corriente de entrada a la planta, y como se ha dicho en los puntos anteriores, al no considerarse parámetro importante para el diseño y estudio de este proyecto, las representaciones se encuentran en el Anexo 1.

### 6.1.4. Resultados SST.

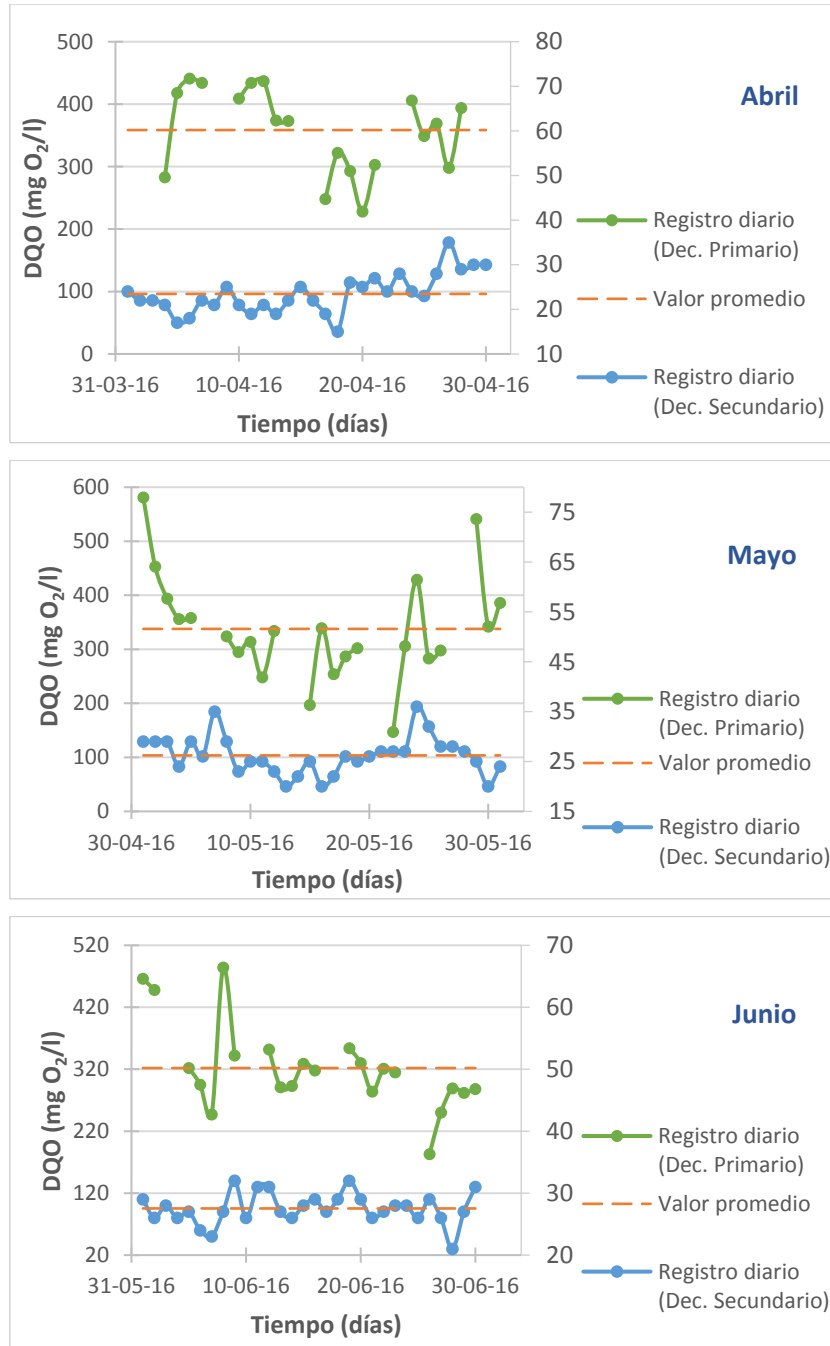


Gráfica 7. Analítica de SST en el decantador primario y secundario.

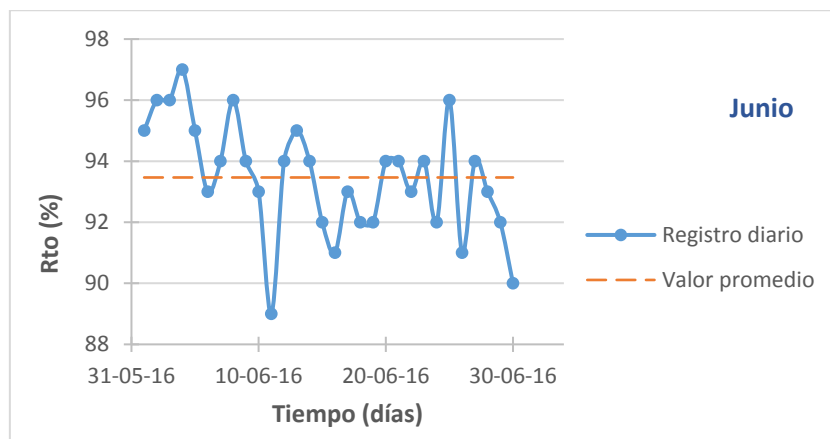
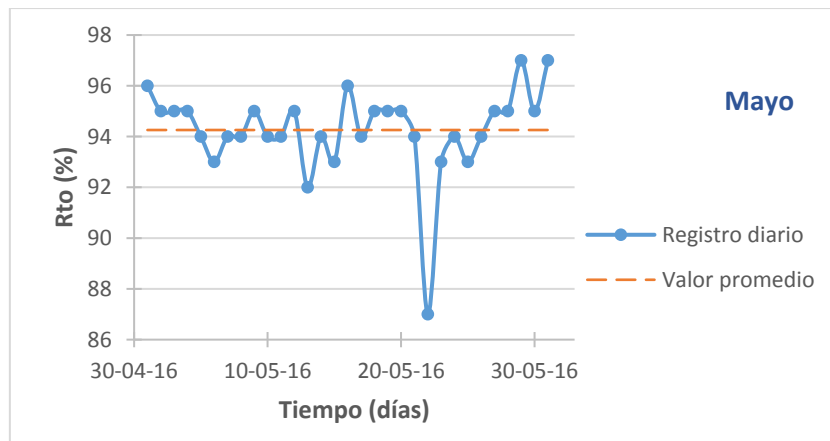
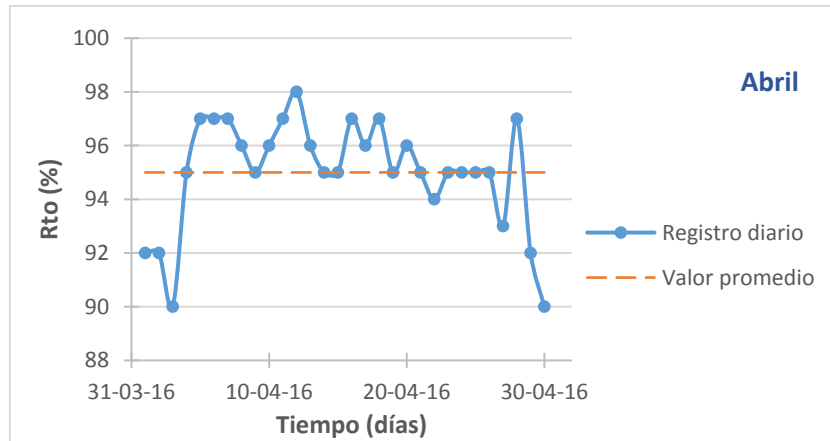


Gráfica 8. Rendimiento total de SST.

6.1.5. Resultados de DQO.

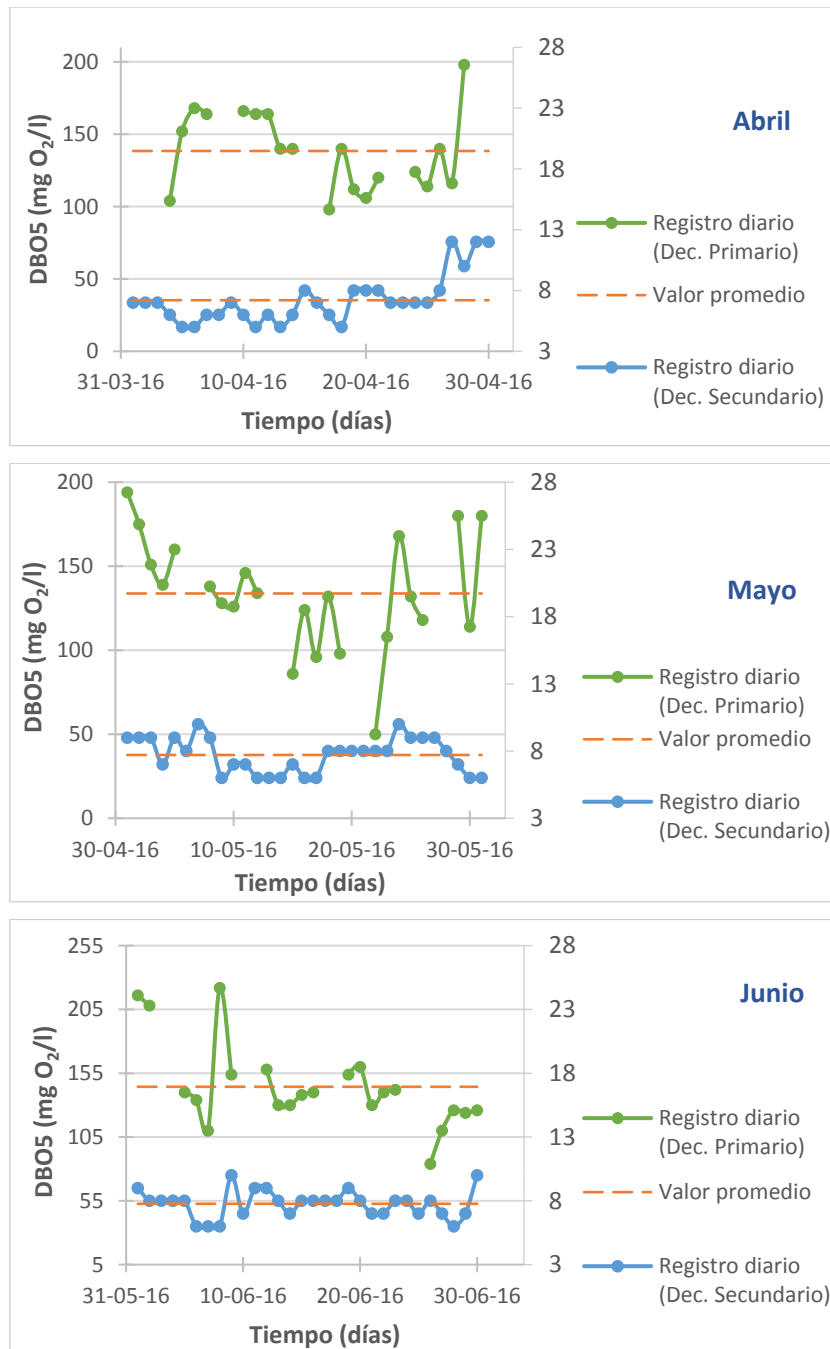


Gráfica 10. Analítica de DQO en el decantador primario y secundario.



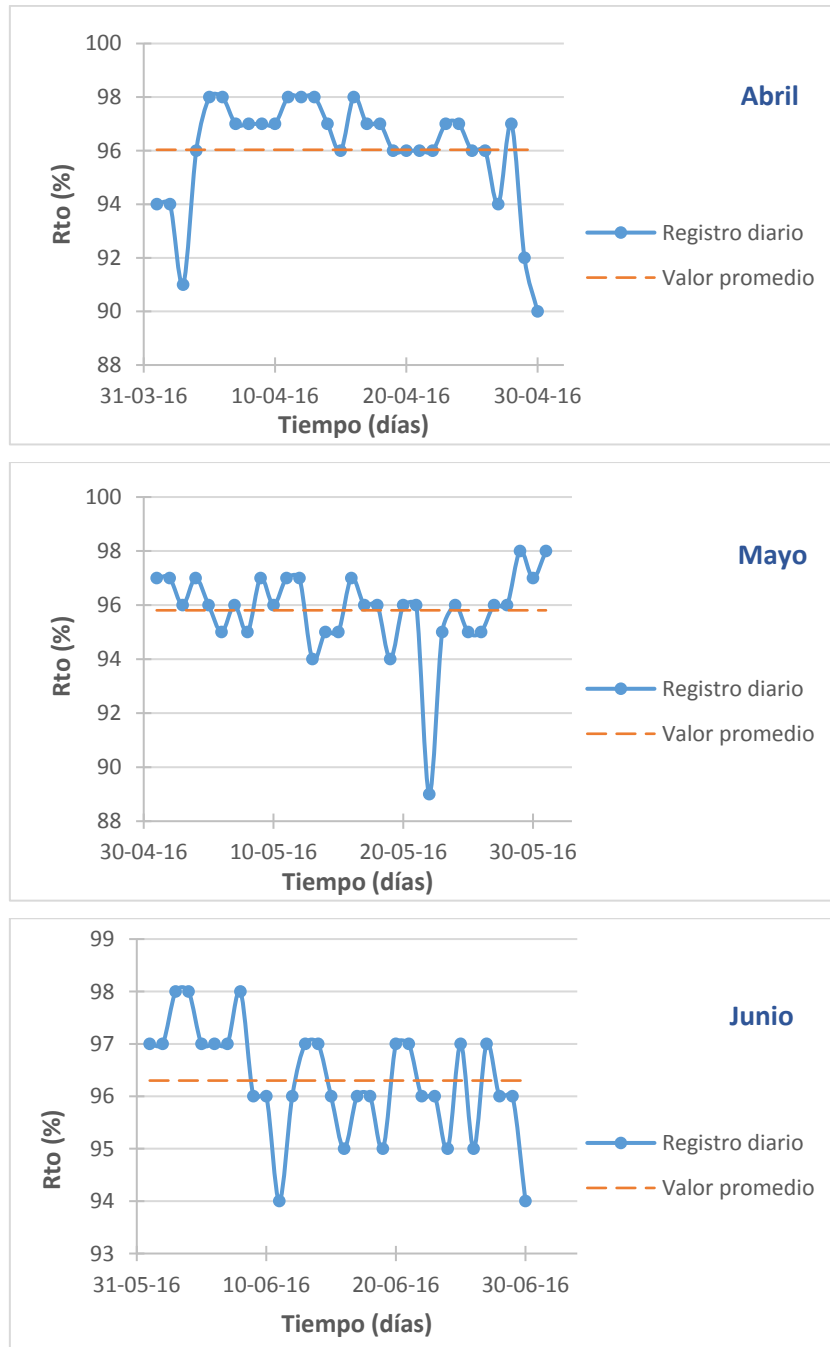
Gráfica 11. Rendimiento Total DQO.

6.1.6. Resultados DBO5.



Gráfica 13. Analítica de DBO5 en el decantador primario y secundario.





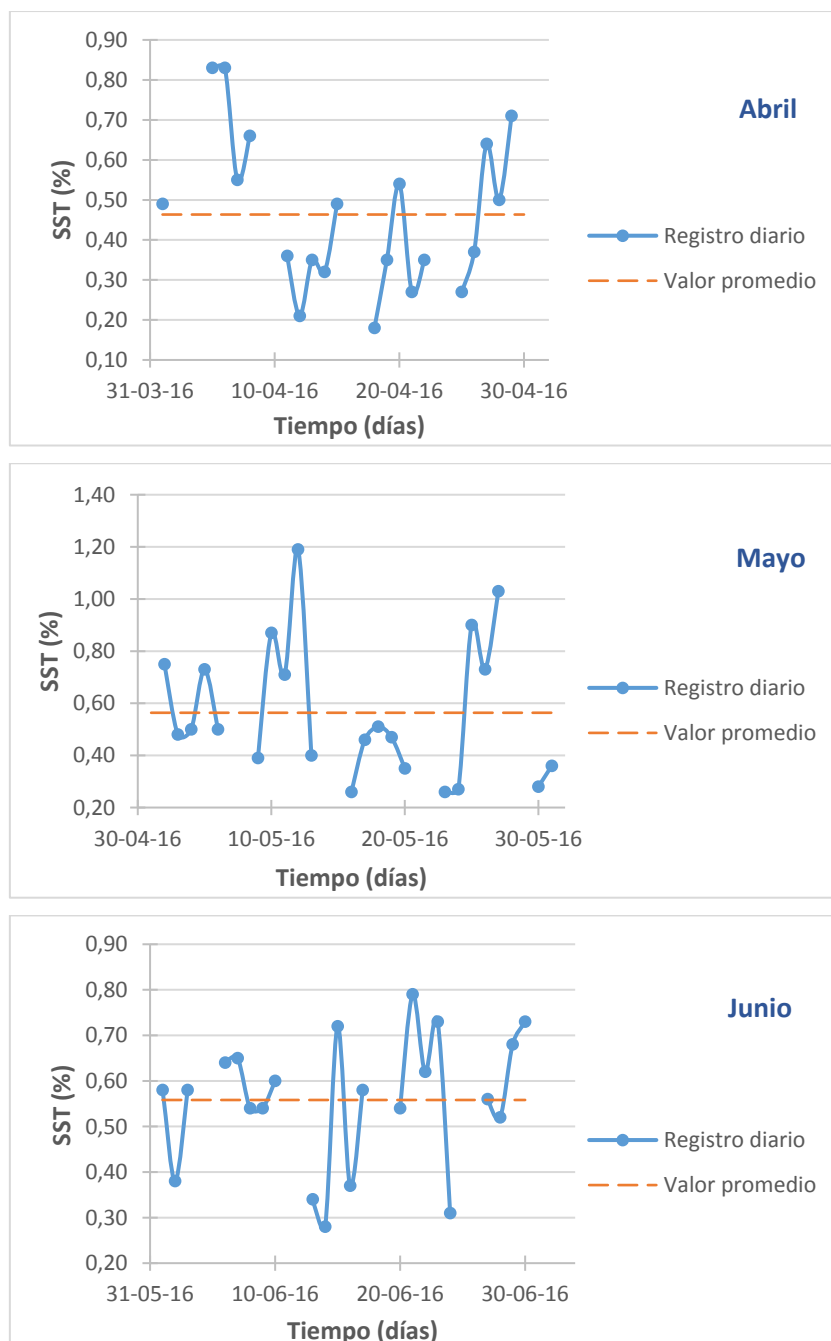
Gráfica 14. Rendimiento total de DBO5.

## 6.2. RESULTADOS ANALÍTICA DE FANGOS.

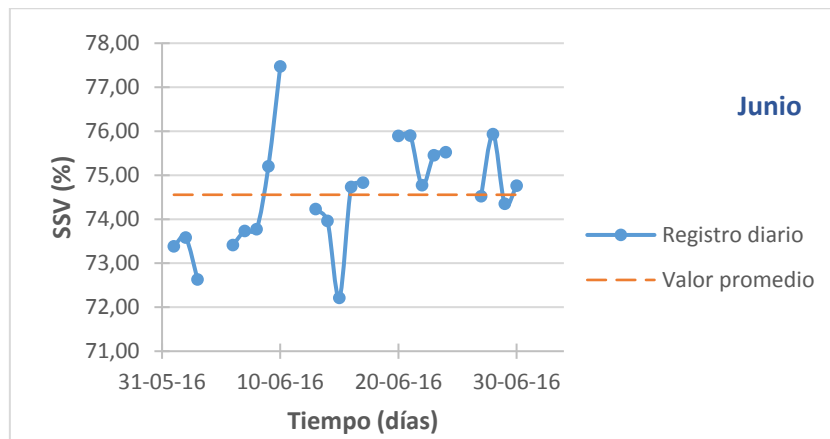
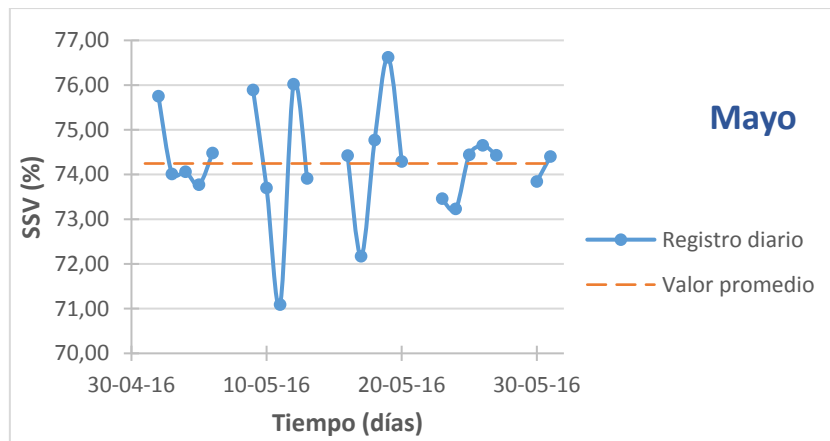
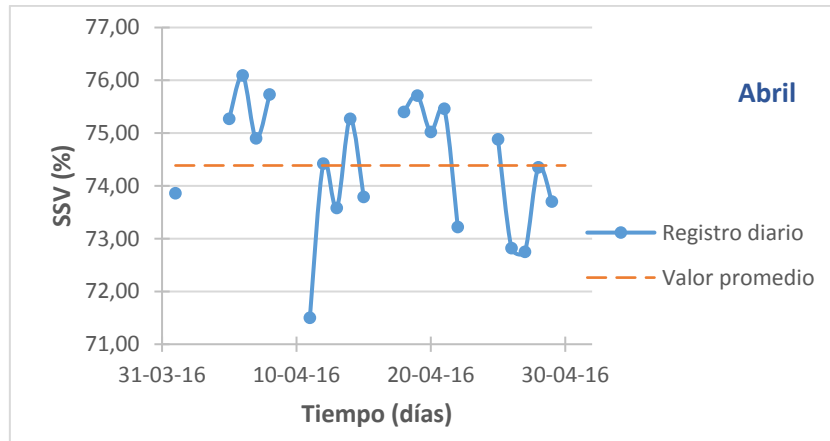
Las medidas de los parámetros correspondientes a la SST y la SSV de cada muestra de fango se representan a continuación.

Por otro lado, debido a que el pH no sufre variación significativa durante los tres meses de análisis, las representaciones de dicho parámetro se encuentran en el Anexo 1.

### 6.2.1. Resultado del fango primario.

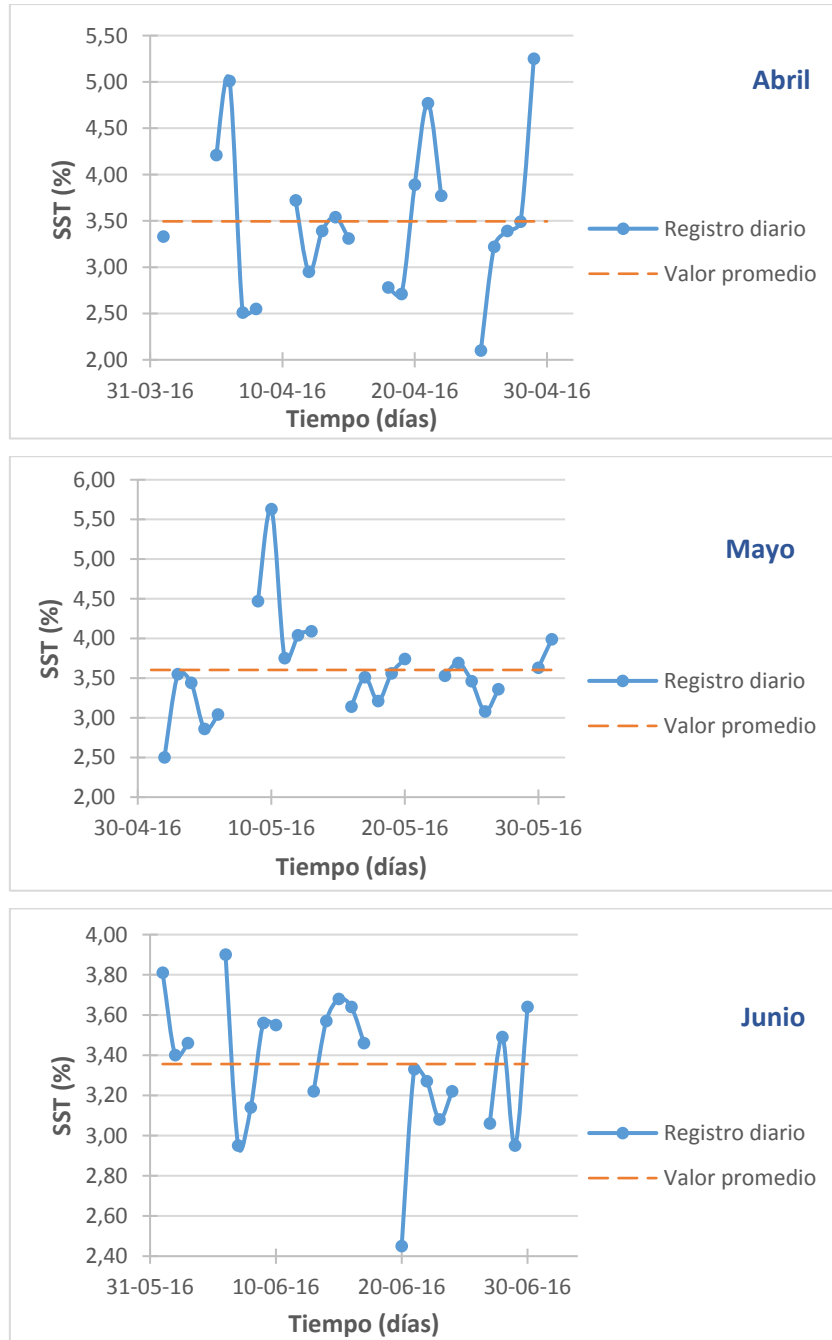


Gráfica 15. Analítica de SST del fango primario.

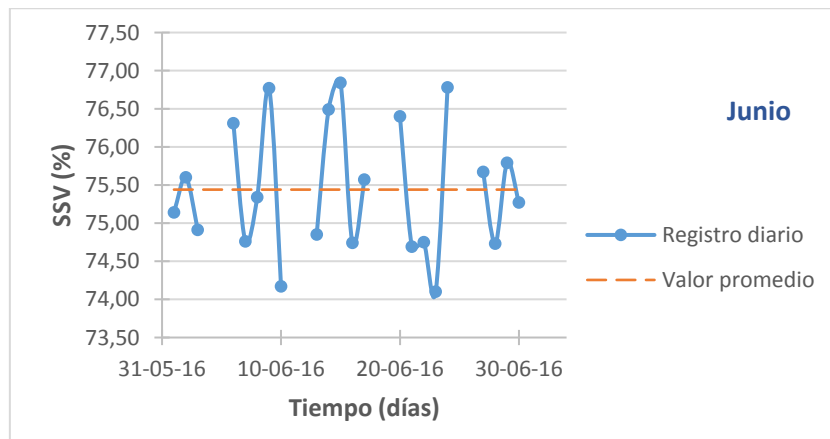
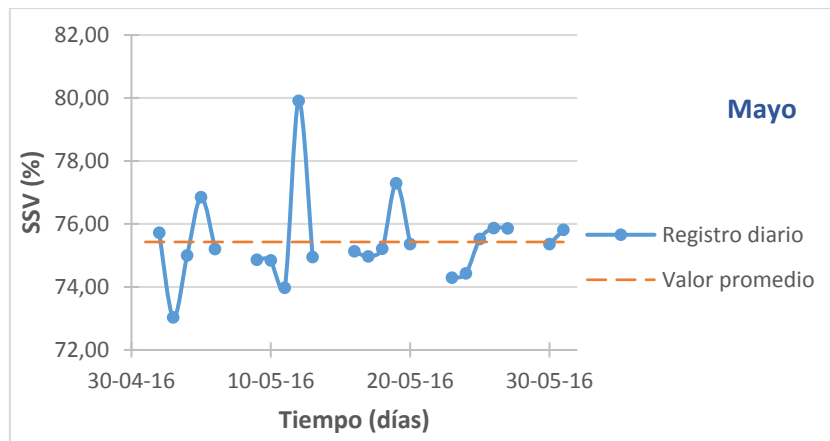
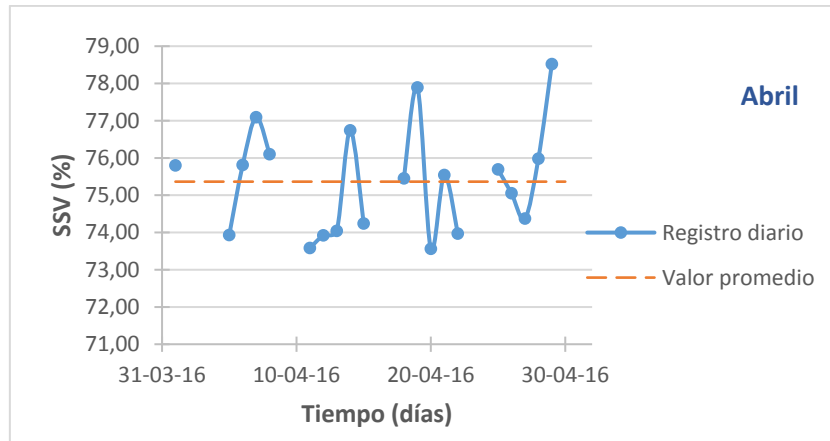


Gráfica 16. Análisis de SSV del fango primario.

### 6.2.2. Resultado del fango primario espesado.

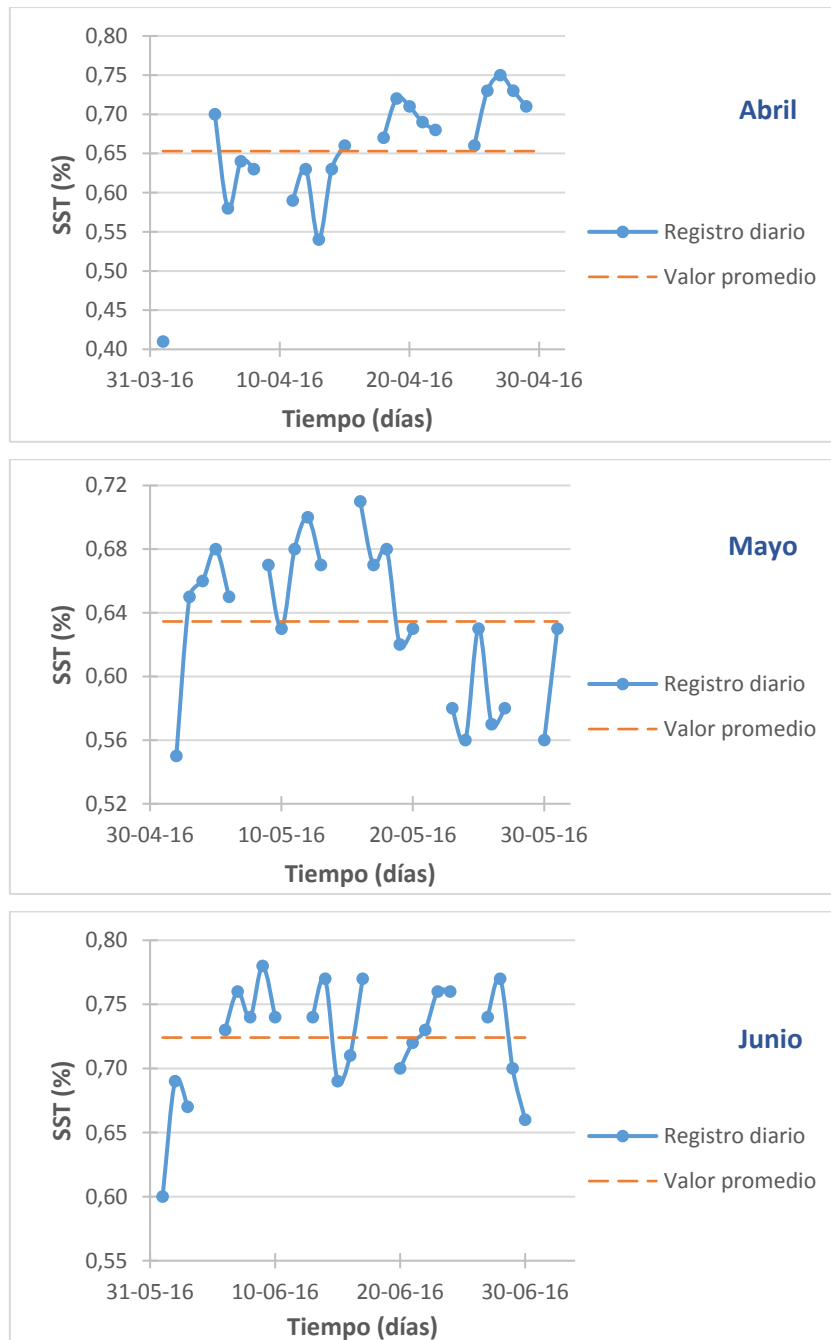


Gráfica 17. Análisis de SST del fango primario espesado.

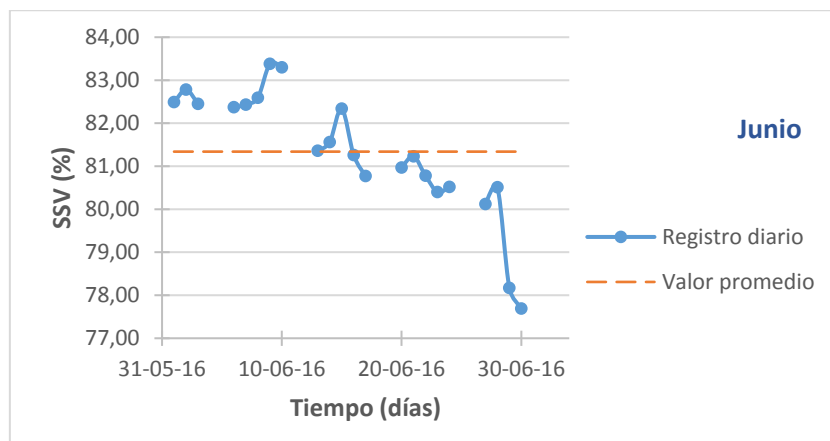
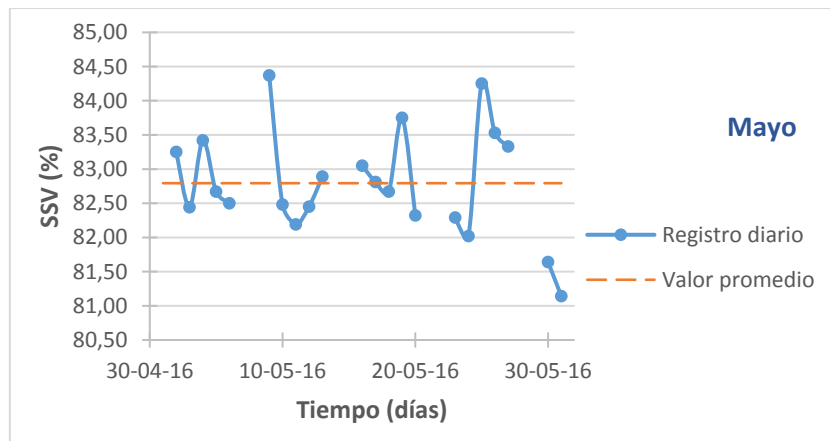
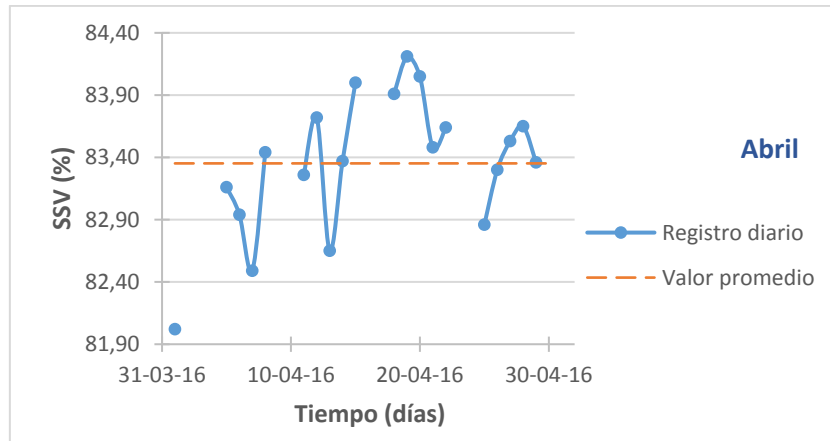


**Gráfica 18. Análisis de SSV del fango primario espesado.**

### 6.2.3. Resultado del fango en exceso.

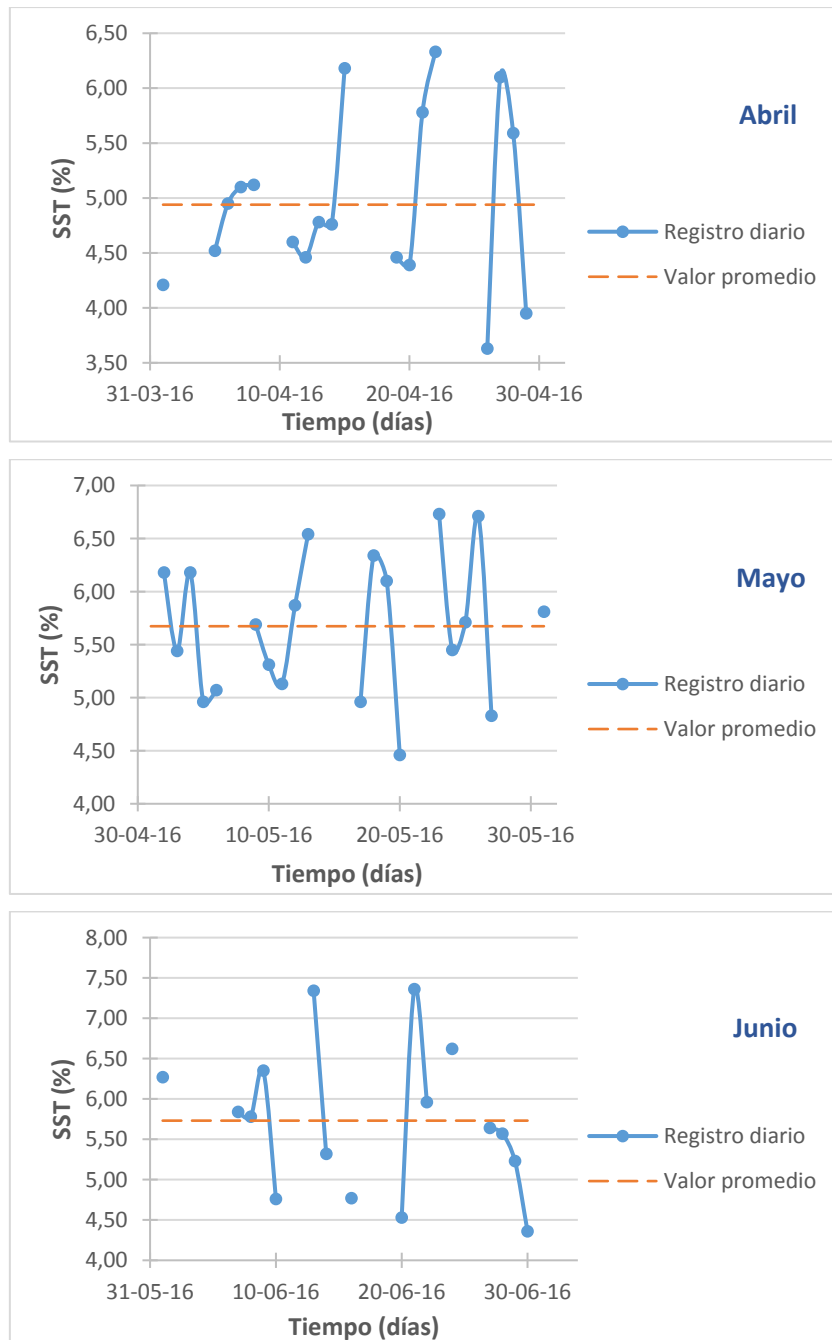


Gráfica 19. Analítica de SST del fango en exceso.



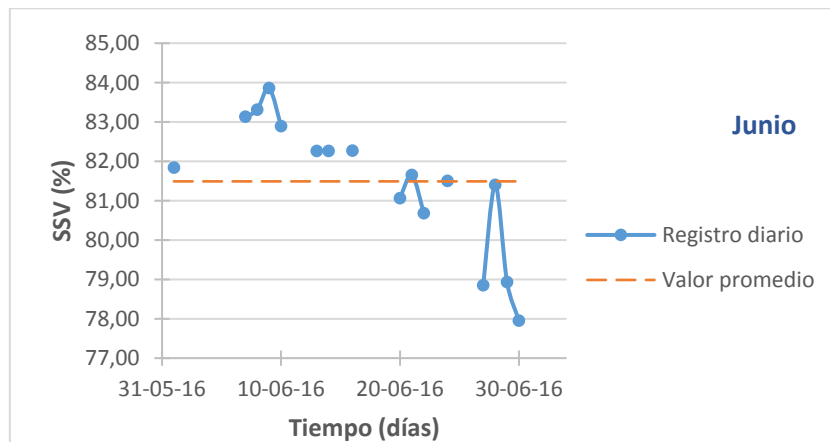
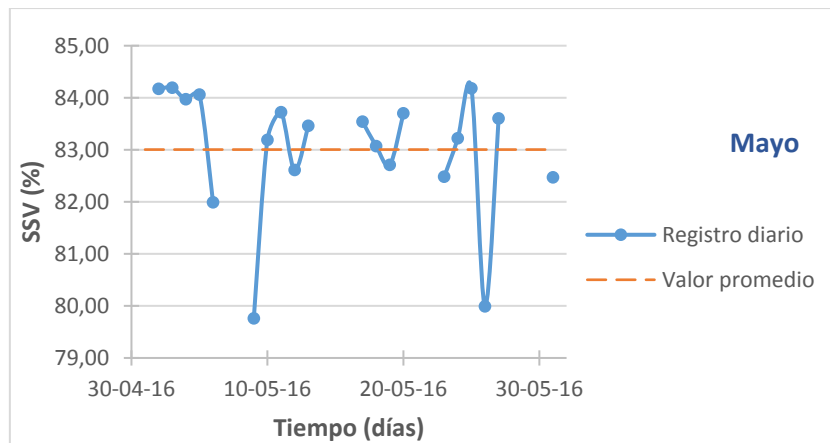
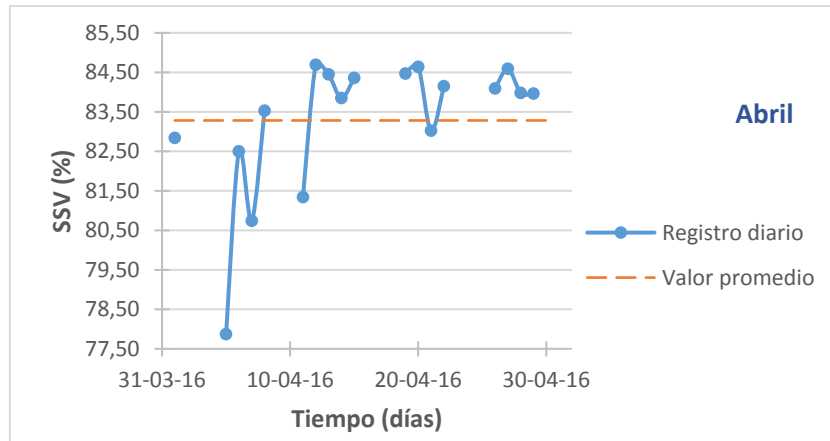
Gráfica 20. Analítica de SSV del fango en exceso.

6.2.4. Resultado del fango en exceso espesado.



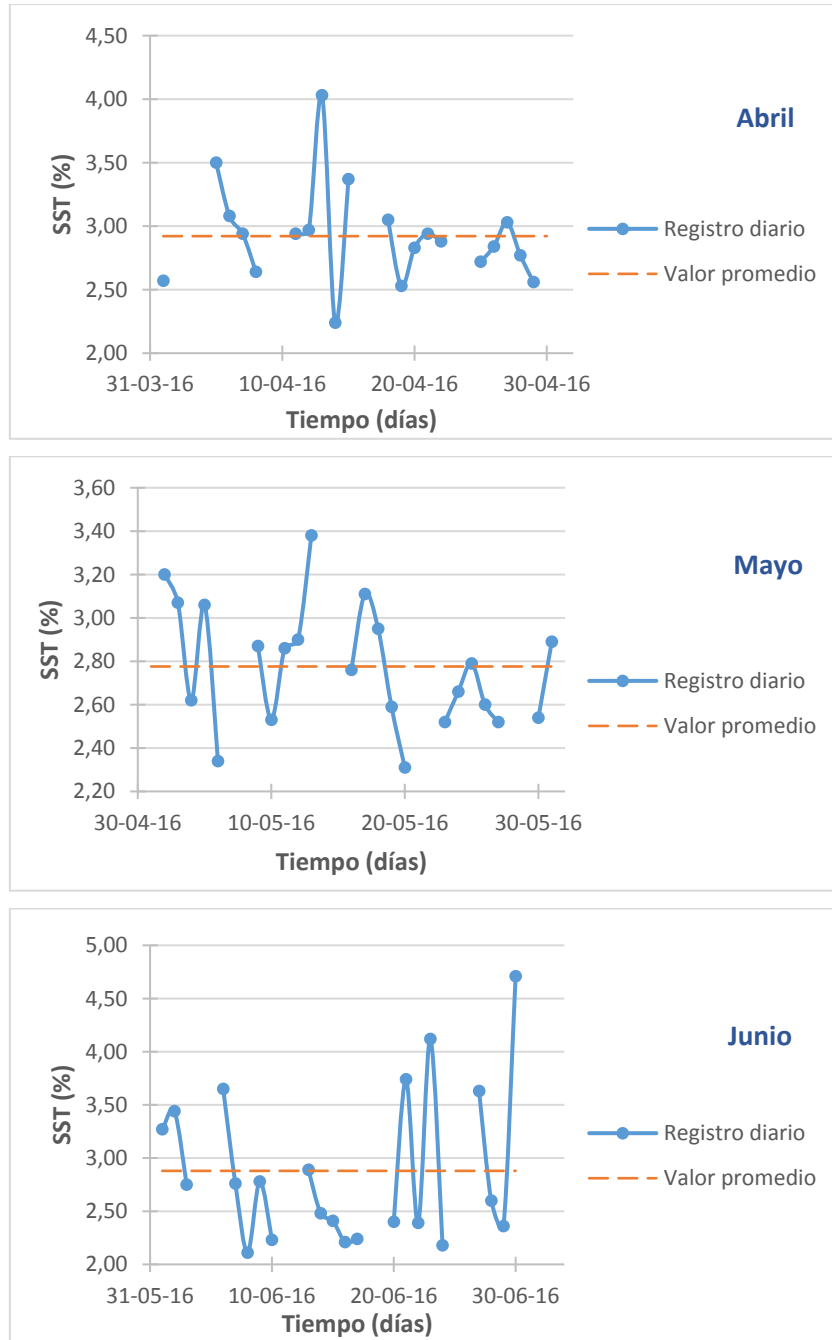
Gráfica 21. Analítica de SST del fango en exceso espesado.



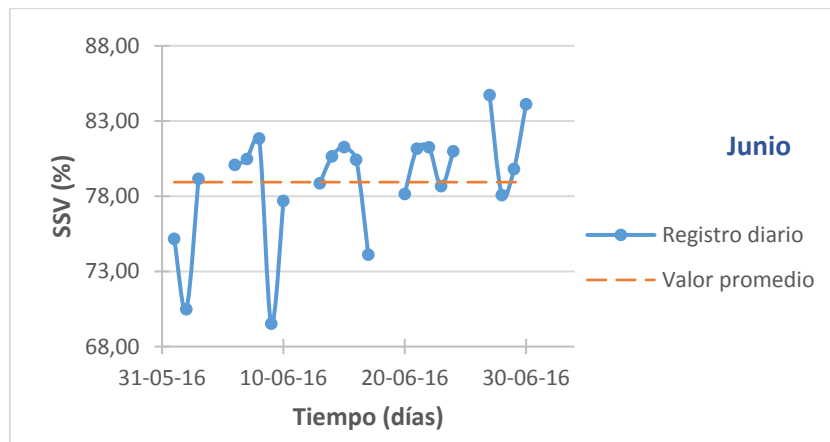
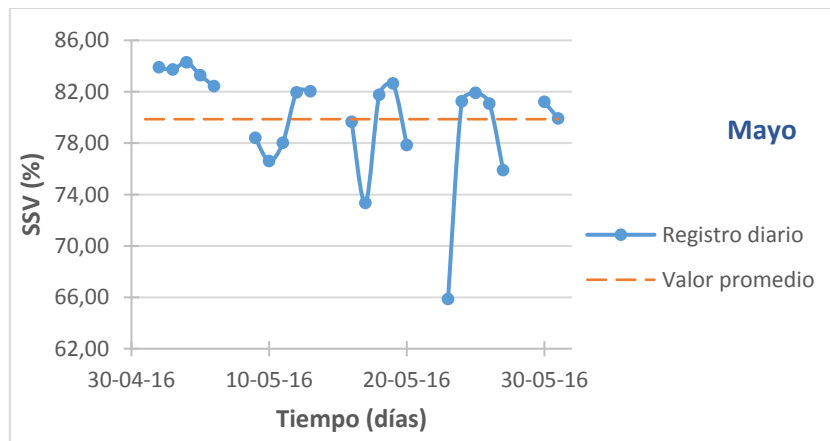
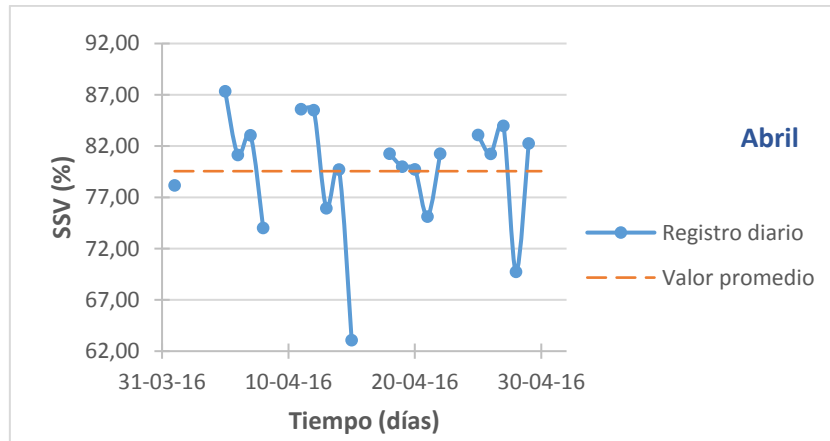


**Gráfica 22. Analítica de SSV del fango en exceso espesado.**

### 6.2.5. Resultado del fango de la cámara de mezcla.

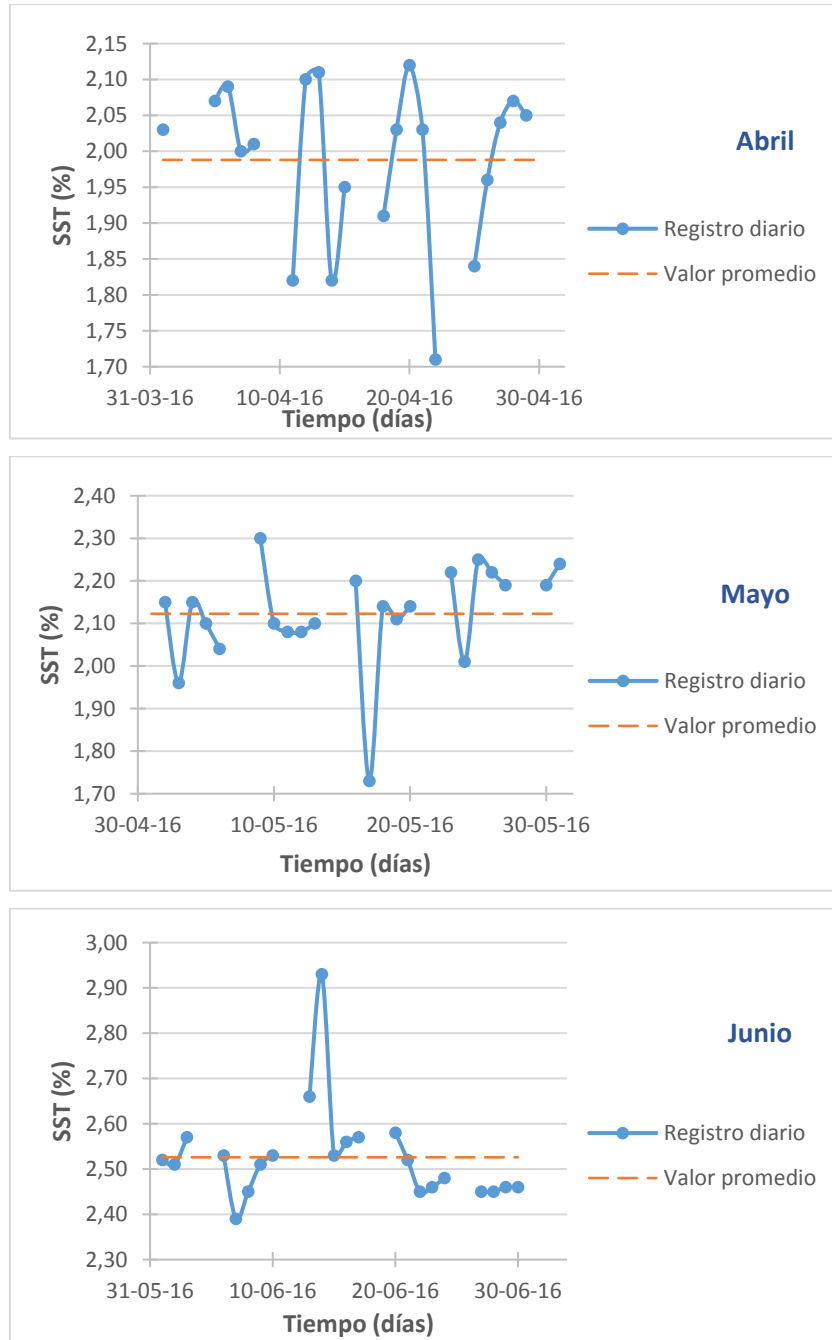


Gráfica 23. Análisis de SST del fango de la cámara de mezcla.

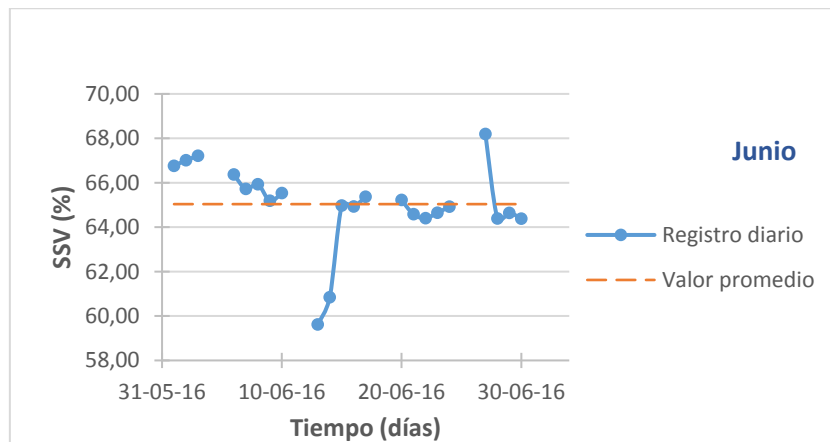
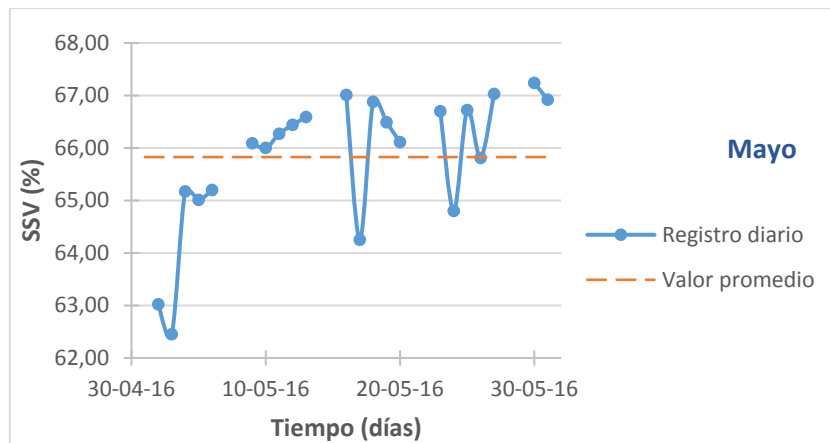
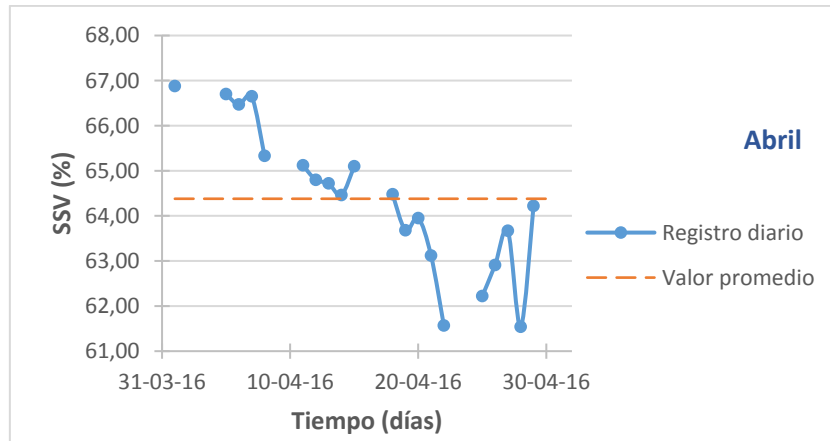


Gráfica 24. Analítica de SSV del fango de la cámara de mezcla.

### 6.2.6. Resultado del fango digerido.

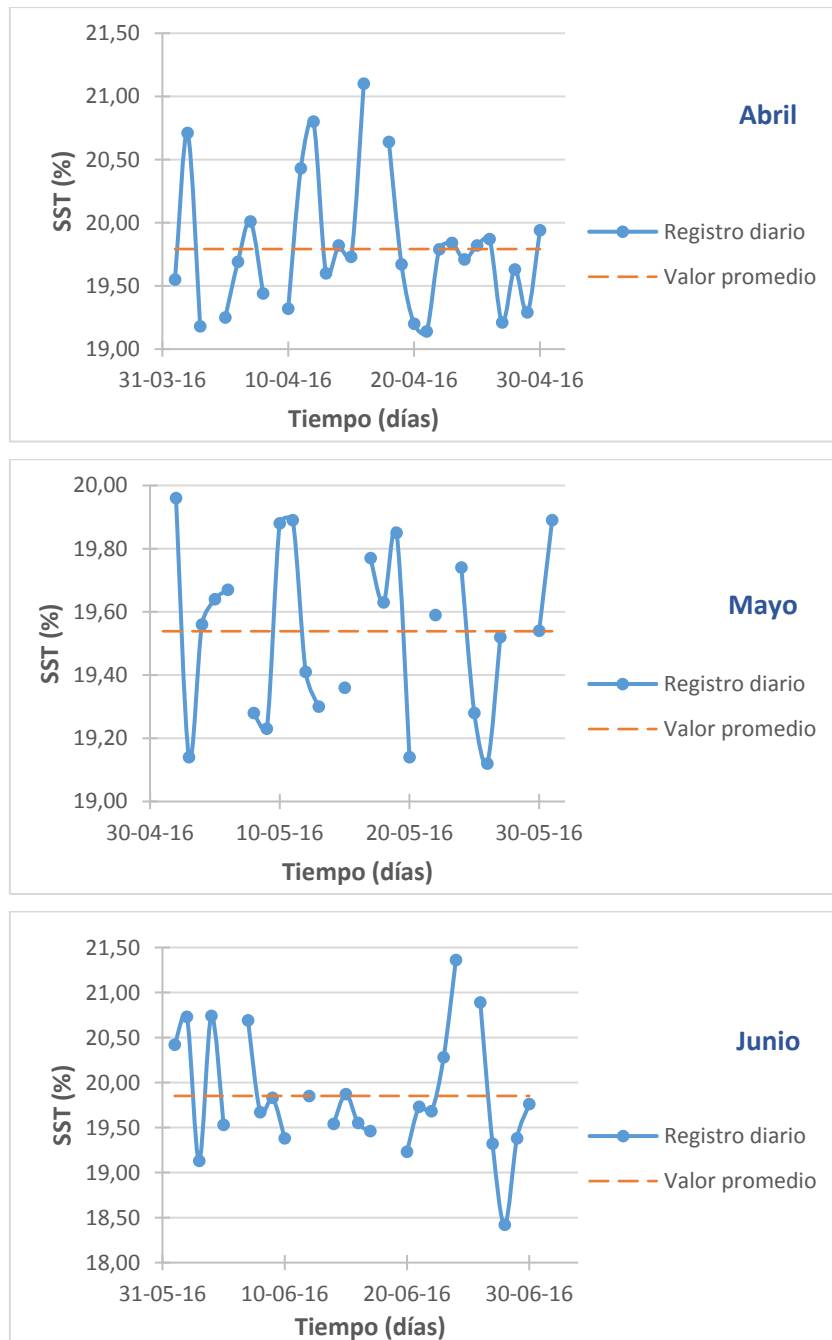


Gráfica 25. Analítica de SST del fango digerido.

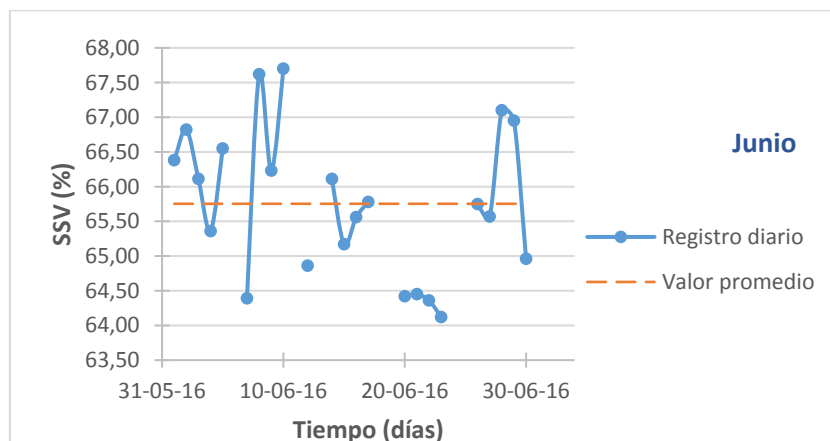
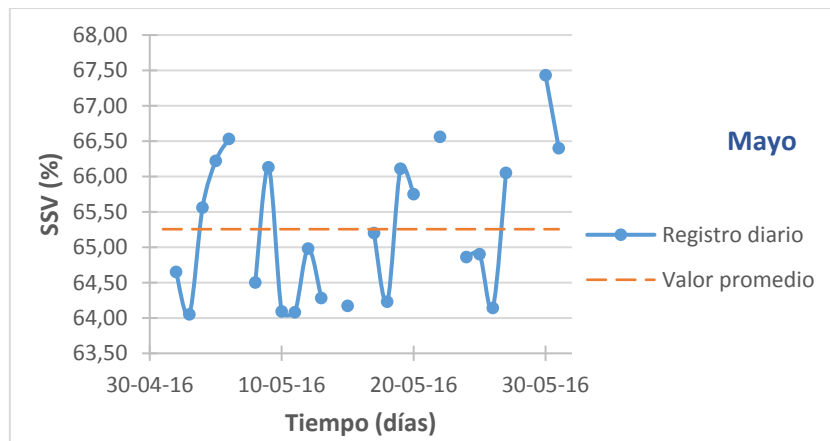
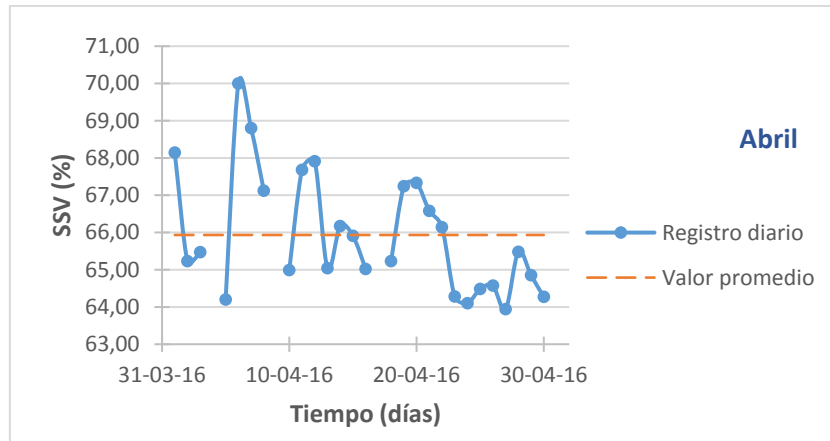


Gráfica 26. Analítica de SSV del fango digerido.

### 6.2.7. Resultado del fango deshidratado.



Gráfica 27. Analítica de SST del fango deshidratado.



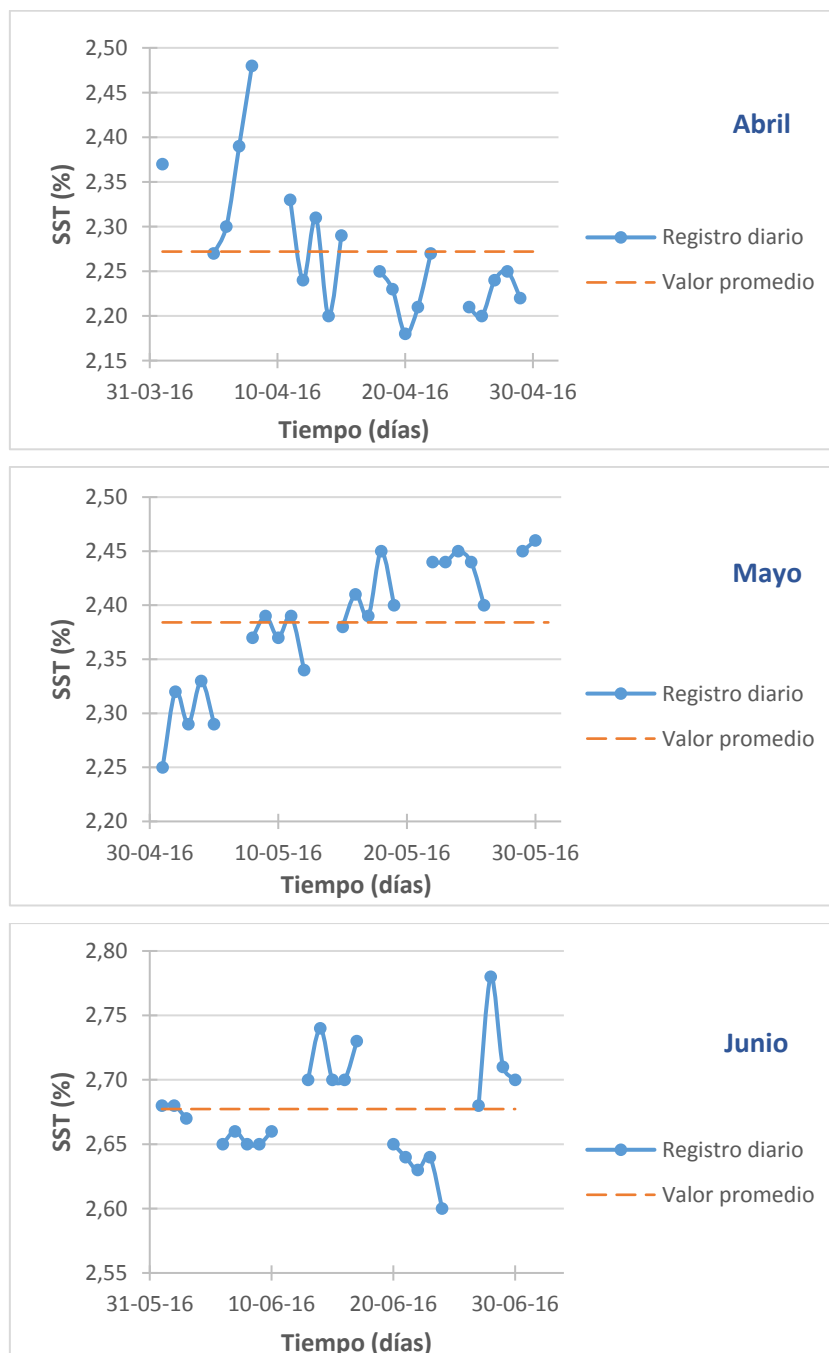
**Gráfica 28. Analítica de SSV del fango deshidratado.**

### 6.3. RESULTADOS ANALÍTICA DE DIGESTIÓN.

Las medidas de los parámetros correspondientes para llevar un control del funcionamiento de los digestores y la producción de biogás se representan a continuación.

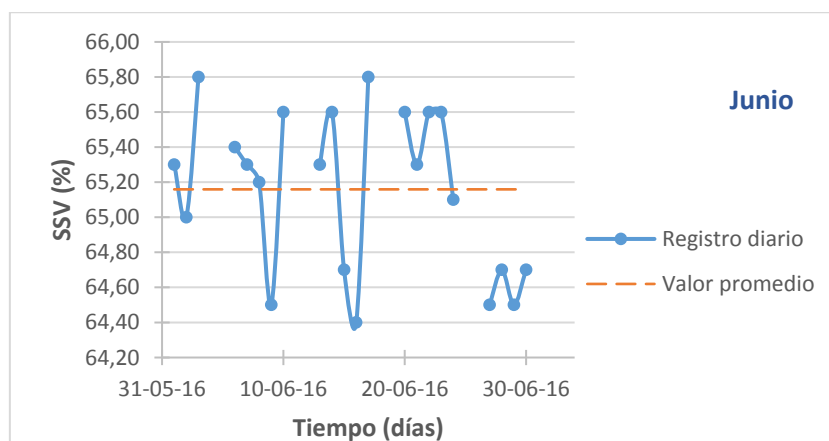
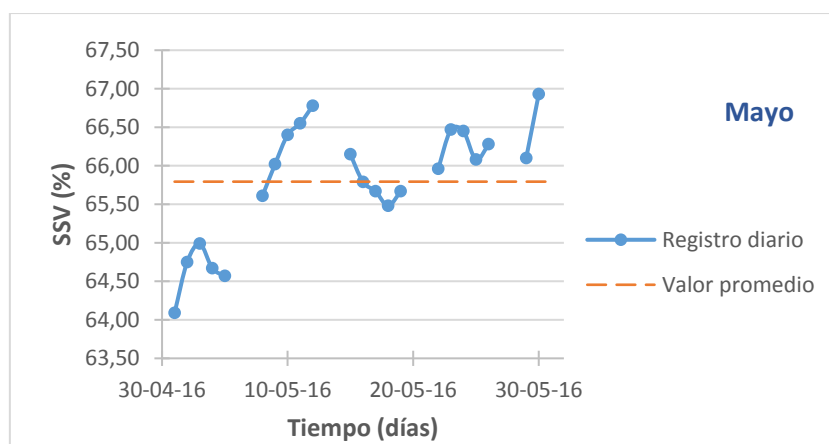
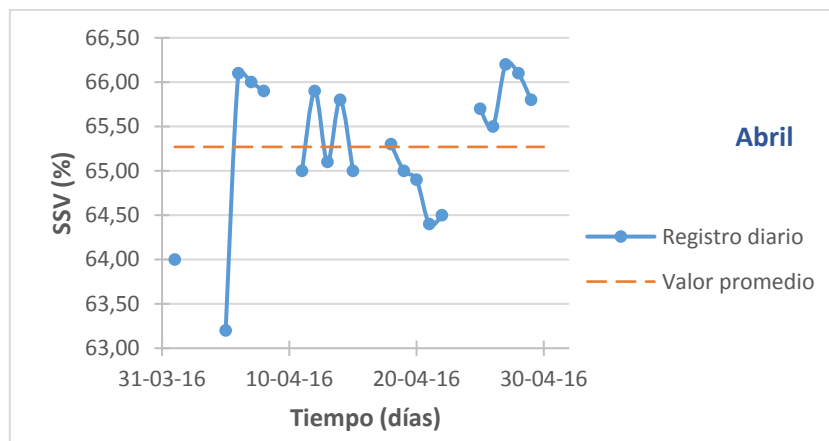
#### 6.3.1. Resultados Digestor B.

En primer lugar, se exponen los parámetros correspondientes a los digestores. Sin embargo, debido a que los tres digestores pertenecientes a la planta funcionan en paralelo, con lo que conlleva un funcionamiento similar, solo se representará uno de ellos (Digestor B), pudiéndose ver los otros en el Anexo 1.



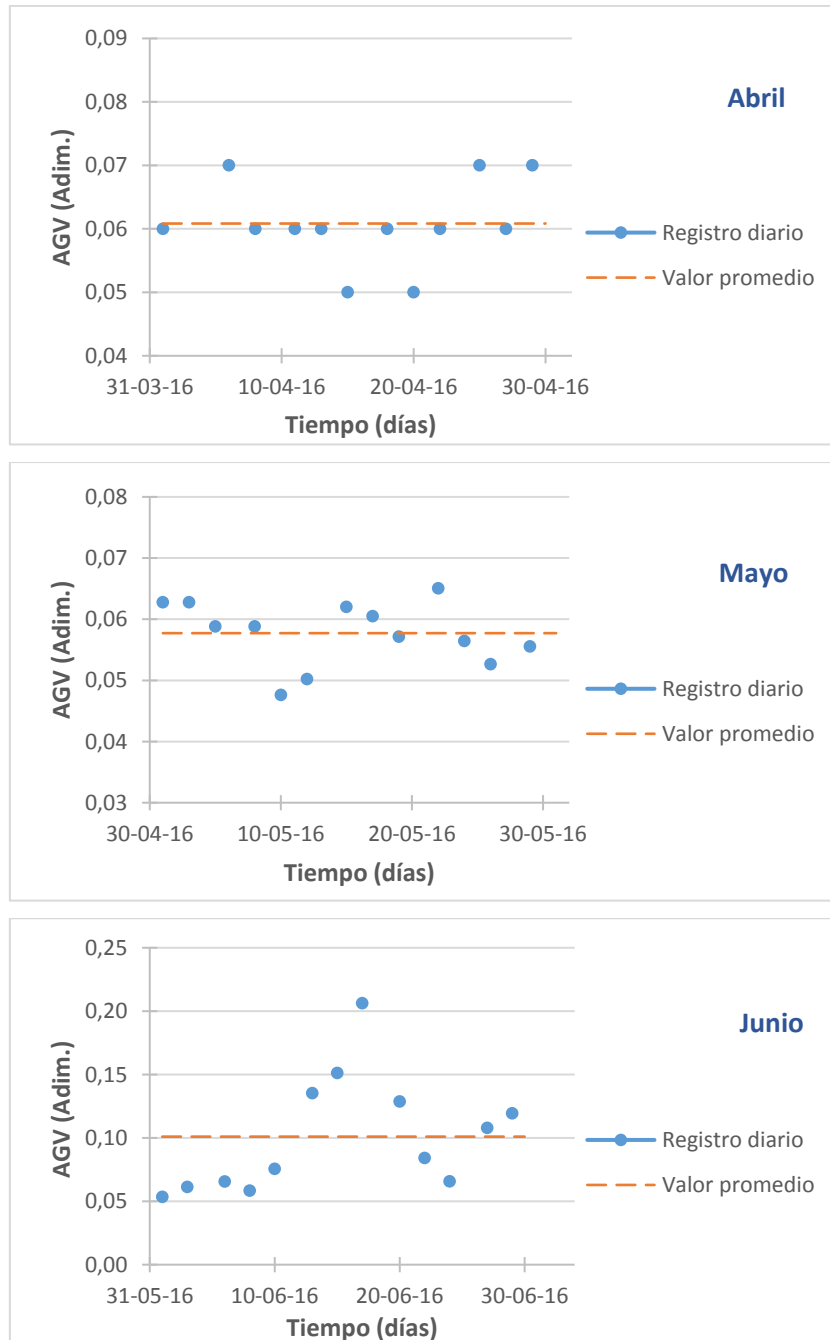
Gráfica 29. Analítica de SST en el digestor B.





**Gráfica 30. Analítica de SSV en el digestor B.**

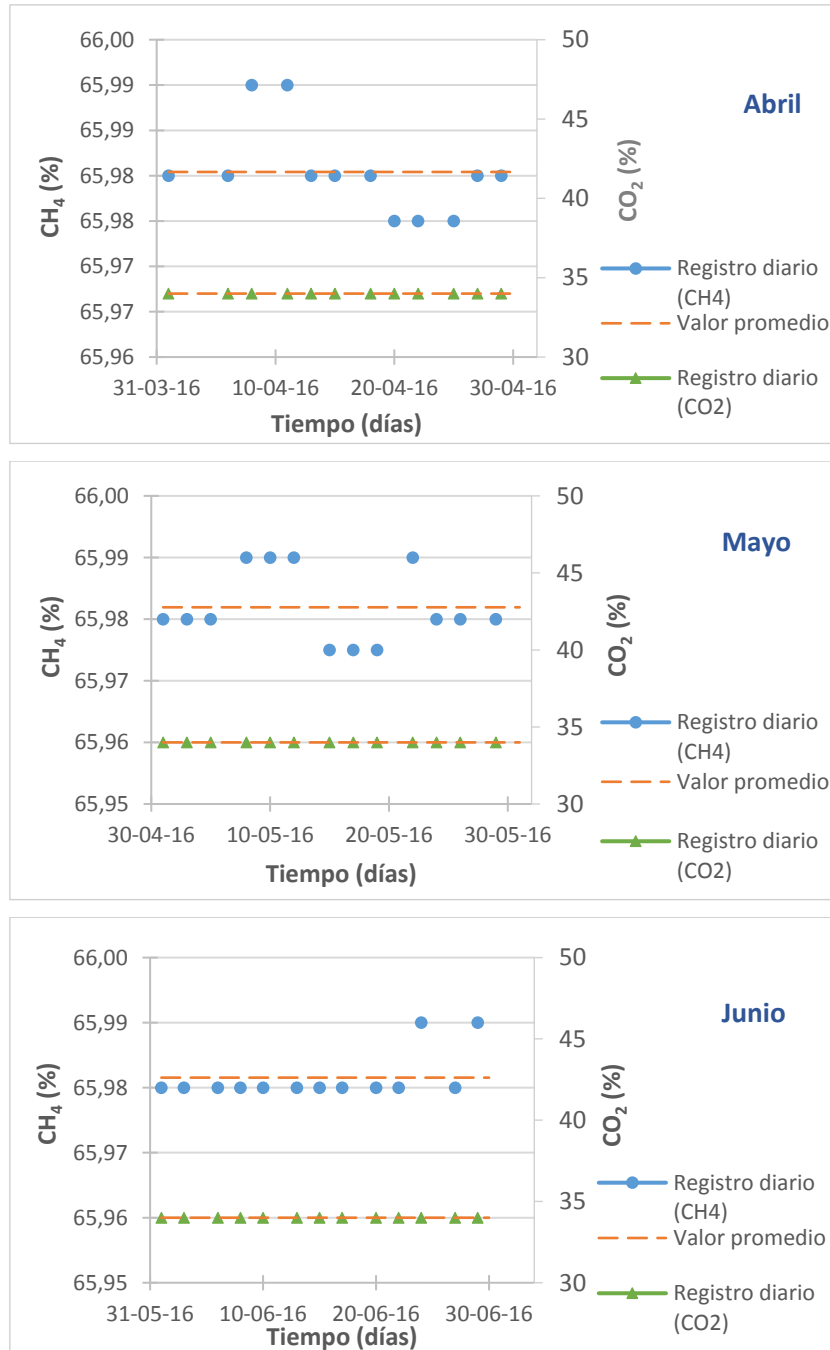
Por último, se representa directamente los valores de AGV, pudiéndose consultar los parámetros correspondientes a TAC y AV en el Anexo 1. En dicho anexo se encuentra también las representaciones del pH y la  $T^a$ , ya que se puede considerar que no tiene variaciones importantes, permaneciendo en un intervalo de (7,5 – 8) uds. de pH y (42 – 46) °C.



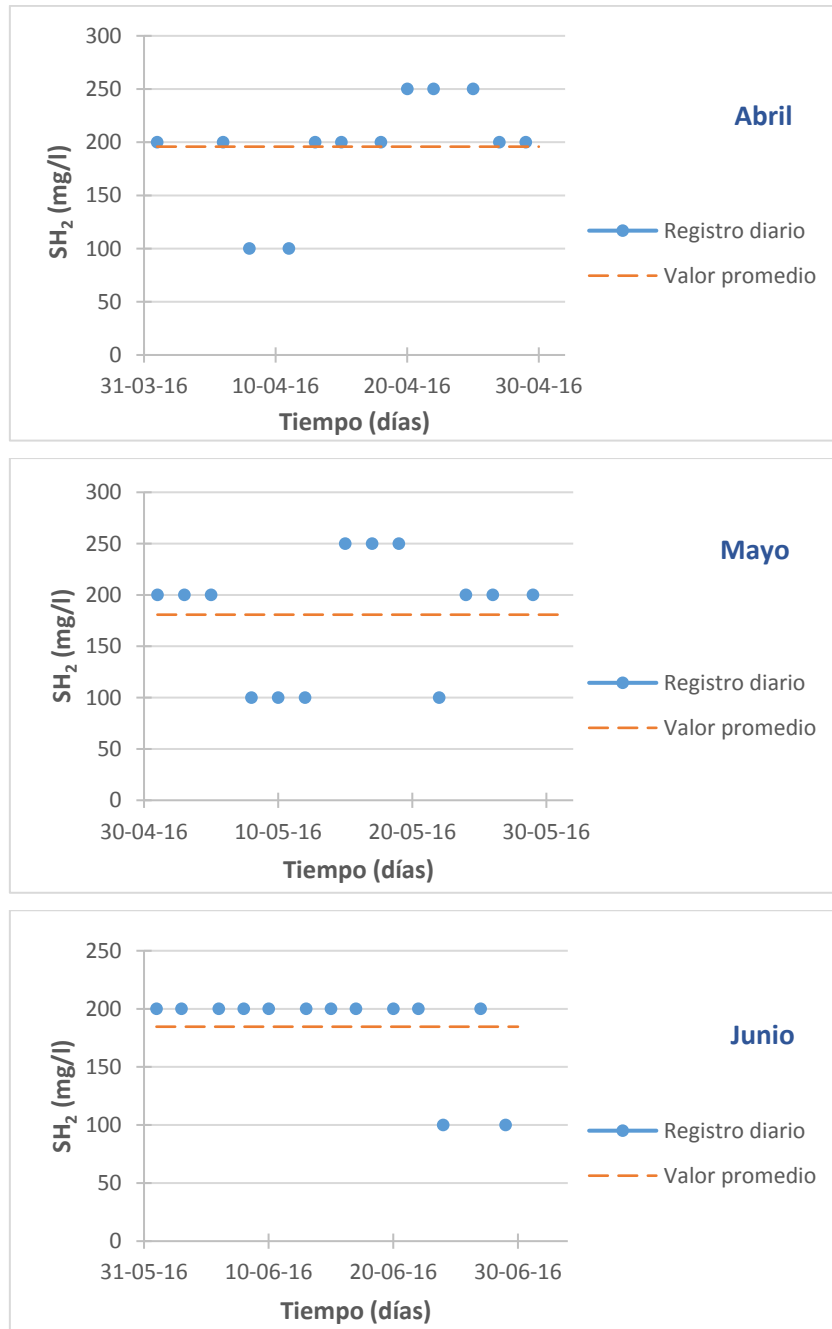
Gráfica 31. Analítica de AGV en el digestor B.

### 6.3.2. Resultados línea de gas.

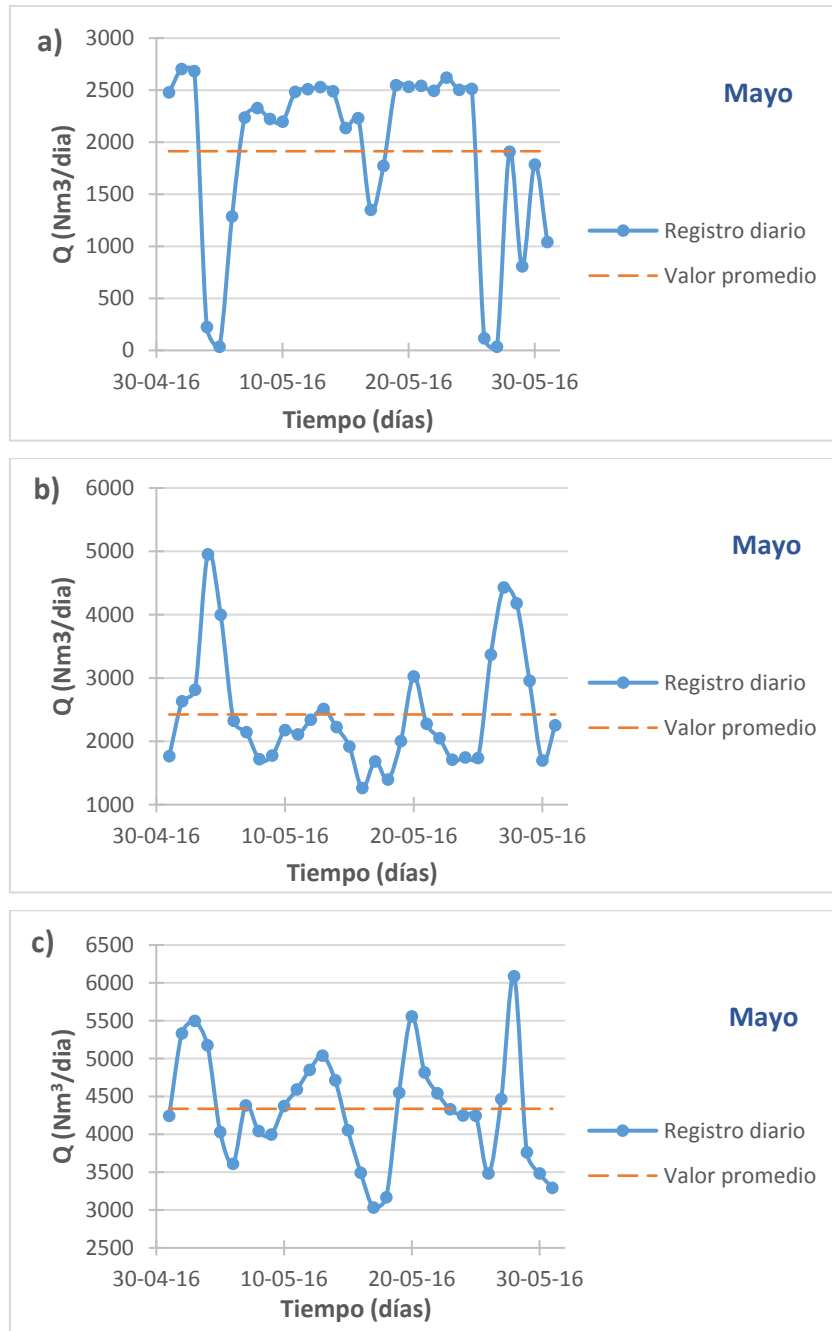
En cuanto a la línea de gas, se representa a continuación los parámetros de control correspondientes a las concentraciones de distintas sustancias, como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y SH<sub>2</sub>; y, por último, se muestran las representaciones de los caudales de gas. En este caso los datos obtenidos corresponden al periodo de un mes, por lo que las representaciones de los caudales son durante el periodo de mayo.



Gráfica 32. Analítica de la concentración de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> en la línea de gas.



Gráfica 33. Analítica de la concentración de  $\text{SH}_2$  en la línea de gas.



Gráfica 34. Caudales de gas. a) Q-Cogeneración. b) Q-Antorcha. c) QT-Biogás.

#### **6.4. RESULTADOS ANALÍTICA DE NUTRIENTES.**

Por último, las distintas medidas de los parámetros correspondiente a los nutrientes en la línea de agua, se representan en el Anexo X, ya que no son determinantes para el diseño y estudio de este proyecto, pudiéndose observar a continuación, en la Tabla 2, los valores promedios correspondientes a cada mes.

**Tabla 2. Valores promedio de cada mes de las analíticas de nutrientes.**

	Abril	Mayo	Junio
<b>Nitrógeno total</b>			
Entrada	28,11	29,64	33,56
Dec. Secundario	5,15	6,61	7,98
Rto. Total	81,78	76,40	76,00
<b>N-NH<sub>4</sub></b>			
Entrada	19,68	18,74	22,01
Dec. Secundario	3,22	3,42	5,46
Rto. Total	83,89	78,50	73,00
<b>N-NO<sub>3</sub></b>			
Dec. secundario	1,33	2,67	2,24
<b>Fósforo total</b>			
Entrada	5,06	5,53	5,73
Dec. Secundario	0,60	0,53	0,37
Rto. Total	87,67	88,60	94,00

## 6.5. RESUMEN DE LOS RESULTADOS.

Los valores promedios de cada parámetro se agrupan a continuación en la Tabla 3, en la cual se puede observar el valor promedio de cada mes, así como la media de estos tres meses, cuyo valor será el que se utilizará para los cálculos de diseño.

**Tabla 3. Valores promedio de cada mes para los diferentes parámetros.**

<b>ANALÍTICA DE AGUAS</b>				
	<b>Abril</b>	<b>Mayo</b>	<b>Junio</b>	<b>V. promedio</b>
Q entrada a la planta (m3/día)	32.930	31.652	30.975	31.852
<b>pH</b>				
Entrada	7,56	7,64	7,64	7,61
Decantador Secundario	7,69	7,79	7,74	7,74
Conductividad (µS/cm)				
Entrada	1.764	1.874	1.943	1.860
Decantador Secundario	1.671	1.762	1.834	1.756
<b>V-60 (ml/l)</b>				
Entrada	5	6	5	5
<b>SST (mg SST/l)</b>				
Entrada	259	222	236	239
Decantador Primario	182	134	145	154
Decantador Secundario	5	4	5	5
Rto Dec. Primario	37	40	38	38
Rto Dec. Secundario	93	97	96	95
Rto Total	98	98	98	98
<b>DQO (mg O2/l)</b>				
Entrada	527	486	461	491
Decantador Primario	359	338	322	340
Decantador Secundario	23	26	28	26
Rto Dec. Primario	37	32	27	32
Rto Dec. Secundario	93	92	91	92
Rto Total	95	94	93	94
<b>DBO5 (mg O2/l)</b>				
Entrada	204	202	221	209
Decantador Primario	138	134	144	139
Decantador Secundario	7	8	8	8
Rto Dec. Primario	37	34	33	35
Rto Dec. Secundario	95	94	94	94
Rto Total	96	96	96	96
<b>ANALÍTICA DE FANGOS</b>				
<b>pH</b>				
F. Primario	7,02	6,86	6,97	6,95
F. Primario espesado	6,34	6,23	6,28	6,28
F. exceso	7,07	7,05	7,04	7,05
F. exceso espesado	7,63	7,52	7,35	7,50

**Tabla 3. Valores promedio de cada mes para los diferentes parámetros. (Continuación)**

F. mezcla digestión	5,94	6,18	6,16	6,09
F. digerido	7,47	7,50	7,62	7,53
F. deshidratado	8,70	8,50	8,48	8,56
<b>SST (%)</b>				
F. Primario	0,46	0,56	0,56	0,53
F. Primario espesado	3,49	3,60	3,36	3,48
F. exceso	0,65	0,63	0,72	0,67
F. exceso espesado	4,94	5,67	5,73	5,45
F. mezcla digestión	2,92	2,78	2,88	2,86
F. digerido	1,99	2,12	2,53	2,21
F. deshidratado	19,79	19,54	19,85	19,73
<b>SSV (%)</b>				
F. Primario	74,39	74,25	74,56	74,40
F. Primario espesado	75,36	75,43	75,44	75,41
F. exceso	83,35	82,79	81,34	82,49
F. exceso espesado	83,28	83,00	81,49	82,59
F. mezcla digestión	79,55	79,87	78,94	79,45
F. digerido	64,38	65,83	65,04	65,08
F. deshidratado	65,93	65,26	65,75	65,65
<b>DIGESTIÓN</b>				
<b>SST (%)</b>				
DA	2,12	2,51	2,64	2,42
DB	2,27	2,38	2,68	2,44
DC	2,23	2,47	2,59	2,43
<b>SSV (%)</b>				
DA	63,80	65,95	66,54	65,43
DB	65,27	65,79	65,16	65,41
DC	67,09	66,91	66,94	66,98
<b>Tª (°C)</b>				
DA	47,10	46,32	43,90	45,77
DB	43,50	42,68	45,50	43,89
DC	37,20	37,00	37,00	37,07
<b>pH</b>				
DA	7,78	7,75	7,67	7,73
DB	7,73	7,72	7,77	7,74
DC	7,53	7,49	7,56	7,53
<b>AGV (Adim.)</b>				
DA	0,08	0,08	0,09	0,08
DB	0,06	0,06	0,10	0,07
DC	0,06	0,06	0,06	0,06
<b>LÍNEA DE GAS</b>				
CO2 (%)	-	34	-	34
SH2 (mg/l)	-	181	-	181
CH4 (%)	-	64,98	-	64,98
Q-Antorcha (Nm3/día)	-	2.424	-	2.424
Q-Cogeneración (Nm3/día)	-	1.914	-	1.914
Qt-Biogás (Nm3/día)	-	4.337,26	-	4.337,26



## 7. DISEÑO DE LAS INSTALACIONES.

El diseño de las instalaciones se dividirá en dos puntos, primero se procederá al diseño de la línea de fango y a continuación se diseñará la línea de biogás.

### 7.1. DISEÑO DE LA LINEA DE FANGO.

Las distintas instalaciones de la línea de fango serán diseñadas a continuación a partir de los esperadores, por lo que se comenzará por las corrientes de fango de salida de los decantadores. Como dichas corrientes no son datos, se realiza un cálculo previo al diseño, el cual se puede consultar en el Anexo 2.

#### 7.1.1. Diseño del espesador por gravedad.

El espesador por gravedad tiene como corriente de entrada el fango primario ( $Q_{F1}$ ) procedente del decantador primario, tal y como se muestra en la Figura 9.

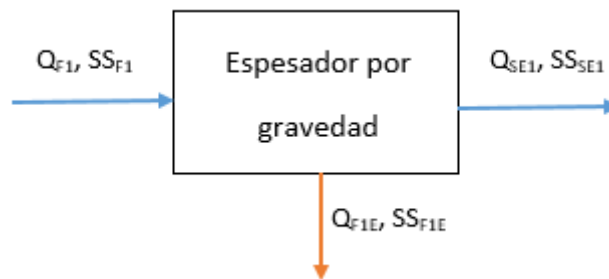


Figura 9. Corrientes de entrada y salida del espesador por gravedad.

Para el dimensionamiento de un espesador por gravedad se utiliza la expresión de carga de sólido ( $C_s$ ), como se puede observar en la Ecuación 9.

$$C_s \left( \frac{kg}{m^2 \cdot día} \right) = \frac{Q_{F1} \cdot SST_{F1}}{A_{EG}} \quad \text{Ec. 9}$$

Según datos bibliográficos, los cuales se pueden consultar en el libro 'Tratamientos de fangos de depuración de aguas residuales' de José A. Mendoza Roca y Amparo Bes Piá, para fango primario  $C_s$  tiene un valor entre 90 y 120 kg/m<sup>2</sup>·día; por lo que los cálculos se realizarán suponiendo el valor máximo.

Por lo tanto, despejando  $A_{EG}$  de la Ecuación 9 se obtiene la sección transversal del espesador por gravedad.

$$A_{EG} = \frac{Q_{F1} \cdot SST_{F1}}{C_s} = \frac{5,3 \left( \frac{kg}{m^3} \right) \cdot 530 \left( \frac{m^3}{día} \right)}{120 \left( \frac{kg}{m^2 \cdot día} \right)} = 23,41 m^2 \approx 24 m^2$$

Por otro lado, sabiendo que la fórmula del área viene dada según la Ecuación 10, despejando de ésta se obtiene el valor del diámetro.

$$A_{EG} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{EG}^2 \quad \text{Ec. 10}$$

$$D_{EG} = 5,53 \text{ m} \approx 6 \text{ m}$$

Para el cálculo del volumen del espesador hay que tener en cuenta el tiempo de residencia ( $tr$ ), como se puede observar en la Ecuación 11, que en la zona de clarificado y sedimentación suele estar entre unas 6 horas. Conociendo el valor del volumen y el área del espesador se puede calcular la altura del mismo, a partir de la Ecuación 12.

$$V_{EG} = tr \cdot Q_{F1} \quad \text{Ec. 11}$$

$$H_{EG} = \frac{V_{EG}}{A_{EG}} \quad \text{Ec. 12}$$

$$V'_{EG} = 132,5 \text{ m}^3 ; H'_{EG} = 5,54 \text{ m}$$

La altura del espesador fue calculada para el volumen de fango en la zona de clarificado y sedimentación, sin embargo, teniendo en cuenta la zona de compresión, hay que sumarle a dicha altura un metro, aproximadamente; por lo que los nuevos valores de altura y volumen del espesador serían los expuestos a continuación.

$$V_{EG} = 156 \text{ m}^3 ; H_{EG} = 6,5 \text{ m}$$

Las dimensiones del espesador por gravedad son las descritas en la siguiente tabla, en la Tabla 4.

**Tabla 4. Dimensiones del espesador por gravedad.**

$A_{EG}$	24 m <sup>2</sup>
$D_{EG}$	6 m
$V_{EG}$	156 m <sup>3</sup>
$H_{EG}$	6,5 m

Por último, se realiza un balance de caudales y cargas en el espesador para calcular la cantidad de fango primario espesado al día. Por lo tanto, siguiendo la nomenclatura de la Figura 9, el balance vendría establecido según la Ecuación 13 y 14.

$$Q_{F1E} + Q_{SE1} = Q_{F1} \quad \text{Ec. 13}$$

$$Q_{F1E} \cdot SST_{F1E} + Q_{SE1} \cdot SST_{SE1} = Q_{F1} \cdot SST_{F1} \quad \text{Ec. 14}$$

Para poder resolver el sistema de dos ecuaciones se ha tenido que suponer unos de los valores de salida, que según se puede consultar en Metcalf & Eddy: “Ingeniería de las Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización”, el parámetro de salida  $SST_{SE1}$  se suele encontrar entre 0 y 0,1 kgSST/m<sup>3</sup>. Por lo tanto, resolviendo el sistema se obtiene que  $Q_{F1E} \approx 74 \text{ m}^3/\text{día}$ .

### 7.1.2. Diseño del espesador mecánico.

El espesador mecánico es el responsable de la concentración del fango proveniente de la decantación secundaria ( $Q_{F2}$ ), como se puede observar en la Figura 10.

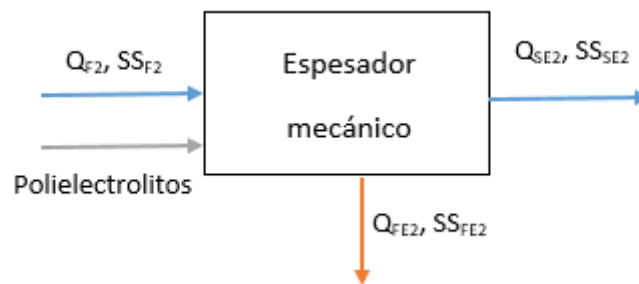


Figura 10. Corrientes de entrada y salida del espesador mecánico.

En el caso concreto de la empresa objeto de estudio, el tipo de espesador que se utiliza para el fango secundario es una centrífuga de marca Huber (modelo centrífuga de tornillo S-DRUM), o similar. Según datos de catálogo, dicha centrífuga tiene un poder de reducción de volumen de fango de un 90 por cien, por lo que, el caudal de fango secundario espesado ( $Q_{F2E}$ ) se puede calcular con dicha relación, tal y como se muestra en la Ecuación 15.

$$Q_{F2E} = Q_{F2} \cdot 0,2 \quad \text{Ec. 15}$$

$$Q_{F2E} = 111,2 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

### 7.1.3. Diseño de la cámara de mezcla.

La cámara de mezcla consiste en un tanque agitado donde las corrientes de entradas son las de fango espesado, como se puede observar en la Figura 11; por lo que su función principal es la mezcla de dichas corrientes antes de su posterior entrada al digestor anaerobio.

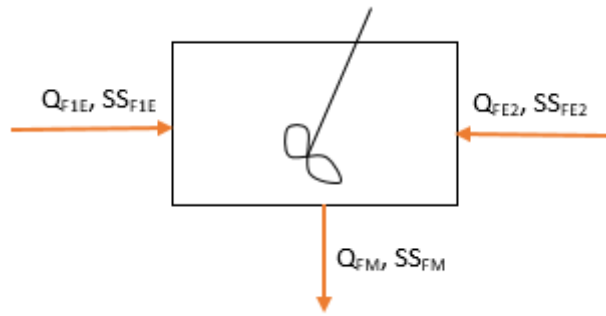


Figura 11. Corrientes de entrada y salida de la cámara de mezcla.

El caudal de salida es la suma de las corrientes provenientes de los espesadores correspondientes, como se puede observar en la Ecuación 18; por ello, dicha corriente de salida se denomina fango mixto ( $Q_{FM}$ ).

$$Q_{FM} = Q_{F1E} + Q_{F2E} \quad \text{Ec. 18}$$

Conocidos los caudales de los fangos espesados, se tiene que  $Q_{FM} = 185,2 \text{ m}^3/\text{día}$ ; considerando un tiempo de residencia ( $tr$ ) de 4 horas, el volumen de la cámara de mezcla se calcula conforme a la Ecuación 19.

$$V_{CM} = tr \cdot Q_{FM} \quad \text{Ec. 19}$$

$$V'_{CM} = 30,86 \text{ m}^3$$

A los digestores se les añadirá un volumen extra por cuestiones de seguridad, y debido a que la cámara de mezcla es el depósito previo a la digestión se le aplicará el mismo criterio, multiplicando así el volumen calculado por un factor de seguridad de 1,2. Por lo que el volumen total de la cámara de mezcla será  $V_{CM} \approx 37 \text{ m}^3$ .

#### 7.1.4. Diseño del digestor anaerobio de fangos.

Según los datos tomados de los digestores de la empresa objeto de estudio para este proyecto, dichos digestores trabajan en rango termófilos. Sin embargo, debido a que uno de los digestores, tal y como se puede observar en las gráficas de temperatura del Anexo 2, trabaja muy cerca del rango mesófilo (digestor A funciona con temperatura media de  $37 \text{ }^\circ\text{C}$ ) el diseño se realizará en un rango mesófilo, ya que este es un rango más restrictivo.

Por lo tanto, los cálculos se realizarán para una temperatura de  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  y un tiempo de residencia de 20 días. Así, el volumen del digestor se calcula según la Ecuación 20.

$$V_{DA} = tr \cdot Q_{FM} \quad \text{Ec. 20}$$

Como se ha dicho en el apartado anterior, dicho volumen debe ser multiplicado por un factor de seguridad ya que hay que tener en cuenta la producción de biogás y espumas. Aplicando un factor de 1,4 tendríamos un volumen de  $V'_{DA} = 5.185,6 \text{ m}^3$ . Sin embargo, dicho volumen corresponde al volumen necesario para digerir la totalidad del fango, que en este caso en particular se divide en tres digestores. Por lo tanto, el volumen unitario por digestor sería  $V_{DA} = 1.728,53 \text{ m}^3 \approx 1.730 \text{ m}^3$ .

Ahora bien, para el cálculo de altura y diámetro del digestor hay que tener en cuenta la geometría del mismo, la cual se puede observar en la Figura 12.

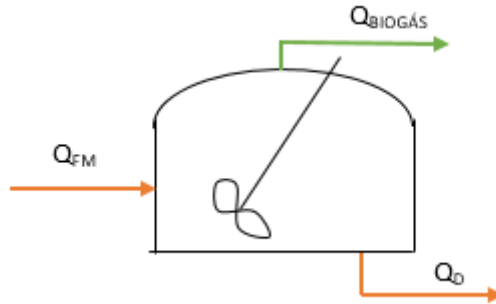


Figura 12. Digestor anaerobio de fangos.

Por otro lado, la altura cilíndrica del digestor tendrá 11 metros y la cúpula será la sexta parte de la altura cilíndrica, aproximadamente 2 metros. Suponiendo que el volumen útil solo se ocupa en la zona cilíndrica, despejando de la Ecuación 21, se obtiene el valor del radio.

$$V_{DA} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{DA}^2 \cdot H_{DA} \quad \text{Ec. 21}$$

$$D_{DA} = 14 \text{ m}$$

#### 7.1.5. Diseño del depósito tampón.

El depósito tampón recibe el fango digerido y es punto previo a la deshidratación, tras la cual el fango es almacenado en una tolva para su posterior evacuación por medio de camiones. Por ello, al pertenecer la tolva y el depósito tampón a la misma corriente, el tiempo de residencia es el mismo para ambos. En este caso, se supone una evacuación de fango diario, por lo que el tiempo de retención es de 24 horas, aproximadamente.

Por lo tanto, el volumen del depósito tampón se puede calcular según la Ecuación 22.

$$V_{DT} = tr \cdot Q_{FD} \quad \text{Ec. 22}$$

Como se puede observar en la Figura 13, hay una corriente de entrada ( $Q_{FD}$ ) y una de salida. Suponiendo que en la digestión el caudal de fango se mantiene, se tiene que  $Q_{FM} = Q_{FD} = Q_{FDT} = 185,2 \text{ m}^3/\text{día}$ .



**Figura 13. Corrientes de entrada y salida del depósito tampón.**

Por lo tanto, el volumen de dicho depósito es  $V_{DT} = 185,2 \text{ m}^3 \approx 186 \text{ m}^3$ . Fijando un diámetro de 7 metros, la altura se despeja de la Ecuación 23.

$$V_{DA} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{DA}^2 \cdot H_{DA} \quad \text{Ec. 23}$$

$$H_{DA} = 4,83 \text{ m} \approx 5 \text{ m}$$

#### 7.1.6. Diseño de la centrífuga para deshidratación de fango.

Para la deshidratación de fango se emplea una centrífuga de la casa comercial Huber (modelo S-PRESS), o similar, la cual tiene un poder de reducción de volumen de un 90 %, como se puede consultar en su catálogo.

El caudal de fango deshidratado ( $Q_{FDH}$ ) se puede calcular según la Ecuación 24.

$$Q_{FDH} = Q_{FDT} \cdot 0,1 \quad \text{Ec. 24}$$

$$Q_{FDH} = 18,52 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

#### 7.1.7. Diseño de la tolva.

La tolva es el último depósito del fango antes de su evacuación de la planta. Por lo que, como se ha dicho en el diseño del depósito tampón, suponiendo una evacuación diaria, su tiempo de residencia sería de un día. Por lo tanto, el volumen de la tolva se establece según la Ecuación 25.

$$V_{TV} = tr \cdot Q_{FDH} \quad \text{Ec. 25}$$

$$V_{TV} = 18,52 \text{ m}^3 \approx 19 \text{ m}^3$$

La tolva tendrá una forma superior rectangular y una inferior piramidal, para facilitar la salida del fango. Suponiendo que la parte superior tiene un ancho de 2 metros y que la parte inferior tiene una altura de 1,5 metros, la altura total se calcula despejando la altura superior de la Ecuación 26.

$$V_{TV} = 2,5^2 \cdot h_{sup} + \frac{1}{3} \cdot 2,5^2 \cdot 1,5 = 19 \text{ m}^3 \quad \text{Ec. 26}$$

$$h_{sup} = 2,54 \text{ m} ; h_T = 4,04 \text{ m}$$

## 7.2. DISEÑO DE LA LÍNEA DE BIOGÁS.

Las distintas instalaciones de la línea de biogás serán diseñadas a continuación a partir de la salida del mismo de digestor anaerobio.

Para su diseño es necesario calcular la cantidad de biogás generado en el proceso de digestión. Para ello, se sabe que por cada kg de DQO eliminada se produce 0,35 Nm<sup>3</sup> de metano.

### 7.1.2. Diseño de la antorcha.

Los digestores anaerobios constan de válvulas de seguridad, las cuales en caso de sobre presión se abren y liberan biogás. La antorcha se encarga, por cuestiones de contaminación, de la combustión de dicho biogás antes de que éste sea liberado a la atmosfera.

Teniendo en cuenta que el caudal promedio diario conducido a la antorcha es de 2.424 Nm<sup>3</sup>, se utilizara una antorcha de la marca Hofstetter (modelo IFL1c), o similar, con capacidad de 120 Nm<sup>3</sup>/día.

### 7.1.3. Diseño del gasómetro.

El gasómetro es un depósito encargado de almacenar el biogás producido en la digestión antes de su utilización para el aprovechamiento energético. A continuación, se calculará la producción teórica de biogás para calcular el volumen requerido de gasómetro.

Según se puede consultar en el libro 'Tratamientos de fangos de depuración de aguas residuales' de José A. Mendoza Roca y Amparo Bes Piá, se produce 0,35 Nm<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por cada kg de DQO eliminada. Además, los fangos mixtos tienen una relación DQO/Materia orgánica (MO) de 1,8. Por lo tanto, con dichas relaciones, se puede calcular la producción de CH<sub>4</sub>.

$$\text{Producción } CH_4 = 0,35 \cdot \frac{Nm^3 CH_4}{kg \text{ DQO eliminada}} \cdot 1,8 \cdot \frac{kg \text{ DQO}}{kg \text{ MO}}$$

$$\text{Producción } CH_4 = 0,63 \cdot \frac{Nm^3 CH_4}{kg \text{ MO eliminada}}$$

Ahora bien, conociendo la cantidad de materia orgánica en el fango a tratar ( $SSV_{FM}$ ), y suponiendo una eliminación de MO en el digestor de 50%, se calcula el caudal de CH<sub>4</sub> según la Ecuación 27.

$$Q_{CH_4} = SSV_{FM} \cdot RTO \text{ Digestor} \cdot \text{Producción } CH_4 \quad \text{Ec. 27}$$

$$Q_{CH_4} = 28,6 \frac{kg MO}{m^3} \cdot 185,2 \frac{m^3}{día} \cdot 0,5 \frac{kg MO eliminada}{kg MO} \cdot 0,63 \frac{Nm^3 CH_4}{kg MO eliminada}$$

$$Q_{CH_4} = 1.668,46 \frac{Nm^3 CH_4}{día}$$

Conocido el volumen de CH<sub>4</sub> se calcula el caudal total de biogás sabiendo que el porcentaje de concentración de éste es de 64,98 %.

$$Q'_{biogás} = \frac{V_{CH_4}}{\%CH_4} = 2.567,66 \frac{Nm^3}{día}$$

Ahora bien, según los datos de la empresa, los caudales de biogás son los siguientes:

$$Q_{Tbiogás} = 4.338 \frac{Nm^3}{día}; Q_{Antorcha} = 2.424 \frac{Nm^3}{día}; Q_{cogeneración} = 1.914 \frac{Nm^3}{día}$$

Por lo tanto, el diseño del gasómetro se realizará en base a los datos de la empresa por ser el volumen mayor, es decir, más restrictivo.

El biogás generado se almacenará en un gasómetro de doble membrana con presión de operación de 25 mbar y 1 día de tiempo de residencia. Por lo tanto, debido a que las condiciones en el interior del gasómetro son diferentes que en el digestor, es necesario recalcular el volumen de biogás. Para ello, se considera el biogás como gas ideal y se le aplica la ecuación de los gases ideales, según la Ecuación 28.

$$p \cdot V_{cogeneración} = n \cdot R \cdot T \quad \text{Ec. 28}$$

En condiciones normales (0 °C y 1 atm), un mol de gas ocupa 22,4 litros; por lo tanto, se puede calcular así los moles de biogás.

$$n_{biogás} = \frac{Q_{cogeneración}}{22,4} = 85.446,43 \frac{moles}{día}$$

A partir de la Ecuación 28, donde R es la constante de los gases ideales (0,082 L·atm/K·mol), se obtiene el caudal de biogás con una presión absoluta de 1,025 atm y una temperatura de 293 K.



$$Q_{cogeneración} = 2.002.864,32 \frac{L}{día} = 2.002,86 \frac{m^3}{día}$$

Y el volumen del gasómetro se calcula según el tiempo de residencia, como se puede observar en la Ecuación 29.

$$V_{gasómetro} = Q_{cogeneración} \cdot tr \quad \text{Ec. 29}$$

$$V_{gasómetro} = 2.002,86 m^3$$

Por lo tanto, el gasómetro utilizado es de doble membrana de la marca Sattler (modelo DMGS), o similar. En catálogo se puede consultar las dimensiones, referenciadas a la Figura 14, las cuales se encuentran resumidas en la siguiente tabla, Tabla 5.

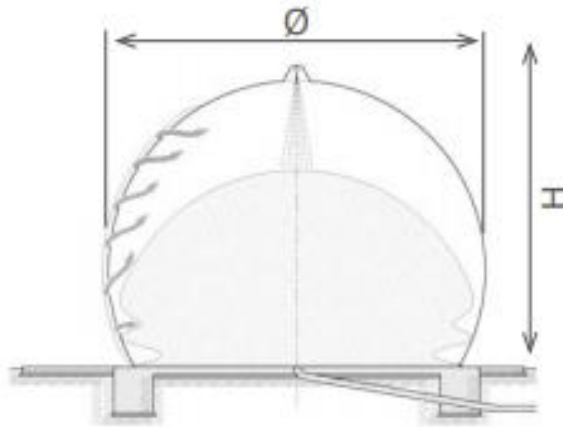


Figura 14. Gasómetro de doble membrana.

Tabla 5. Dimensiones del gasómetro.

$V_{Gasómetro}$	2.150 m <sup>3</sup>
H	12,9 m
Ø	17,2 m

#### 7.1.4. Diseño de las instalaciones para la limpieza del biogás.

El biogás sale del digestor anaerobio saturado de humedad y puede contener sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), el cual es corrosivo, pudiendo ser dañino para el motor y/o la caldera. Por ello es importante la limpieza del mismo.

En primer lugar, la humedad se elimina con purgadores al condensarse ésta en las tuberías. Por otro lado, el H<sub>2</sub>S se elimina utilizando una torre de desulfuración con carbón activo. Para

ello, se utiliza una torre de la casa comercial TECNIUM o similar, con capacidad máxima de 90 m<sup>3</sup> al día.

#### **7.1.5. Diseño del motor de cogeneración.**

El motor de cogeneración recibirá la corriente de biogás libre de sulfuro y humedad con el propósito de producir energía eléctrica. El motor utilizado será de la casa comercial JENBACHER (modelo Tipo 3-J320) o similar, cuyas características se pueden observar en la Tabla 6.

**Tabla 6. Datos técnicos del motor de cogeneración.**

Nº cilindros	20
Cilindradas total	48,7 L
Potencia eléctrica	5.240 kW
Potencia térmica	2.960 kW

## 8. ESTUDIO DE RENTABILIDAD DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

Con el biogás generado en la digestión anaerobia se puede realizar un aprovechamiento energético, obteniendo así un beneficio económico; bien, vendiendo éste recurso a empresas externas, o bien autoabasteciéndose con la generación de energía eléctrica a partir de motores de cogeneración.

En este proyecto se estudiará el supuesto de la producción de energía eléctrica a partir de un motor de cogeneración, el cual ha sido diseñado en el apartado anterior. Dicha energía se utilizará para el autoabastecimiento de la EDAR, suponiendo así un ahorro económico, el cual será calculado a partir de la cantidad de biogás generado.

En primer lugar, a partir de la Ecuación 30, se calcula la energía eléctrica producida a partir de poder calorífico inferior (PCI) del metano y de la fracción de éste en el caudal de biogás producido.

$$\text{Energía eléctrica} \left( \frac{kWh}{\text{día}} \right) = PCI_{\text{biogás}} \cdot Q_{\text{biogás}} \quad \text{Ec. 30}$$

Según datos del IDEA, el PCI del metano es 9,96 kWh/Nm<sup>3</sup>. Por lo tanto, el PCI del biogás se calcula según el tanto por cien del metano en el biogás a partir de la Ecuación 31.

$$PCI_{\text{biogás}} \left( \frac{kWh}{Nm^3} \right) = 9,96 \frac{kWh}{Nm^3} \cdot 0,6498 = 6,472 \frac{kWh}{Nm^3} \quad \text{Ec. 31}$$

Por lo tanto, si el biogás de cogeneración es 1.914 Nm<sup>3</sup>/día, la energía eléctrica producida es de 12.387,41 kWh/día.

Realizando el estudio de rentabilidad por año, se tiene una producción de energía eléctrica de 4.521.403,92 kWh/año. Suponiendo una tarifa normal, según datos de la empresa ENDESA, el costo de la electricidad es de 0,11037 €/kWh. Por lo tanto, **el ahorro energético sería de 499.027,35 € al año.**



## **9. CONCLUSIONES.**

En el presente proyecto se ha diseñado un digestor anaerobio con producción biogás, cumpliendo así los objetivos principales. El digestor tiene un volumen total de 1.730 m<sup>3</sup>, en el cual se ha tenido en cuenta el volumen necesario para la producción de biogás y la formación de espuma.

Por otro lado, se ha diseñado un gasómetro 2.150 m<sup>3</sup> para almacenar 2.002,86 m<sup>3</sup>/día. Para ello, se ha decidido utilizar un gasómetro de doble membrana.

Además, se ha realizado un estudio económico, en el cual se puede observar que la implantación de cogeneración supone una producción de 12.387,41 kWh/día, lo que conllevaría un ahorro de casi medio millón de euros al año en energía eléctrica.

Yendo más allá de las cuestiones económicas, se puede concluir que el aprovechamiento del biogás generado supone una ventaja a nivel medioambiental, disminuyendo así los gases del efecto invernadero, debido a la captura y combustión del metano contenido en el biogás.

Por otro lado, y no menos importante, se reduce el uso de combustibles fósiles, apostando así por una fuente de energía renovable, como es el biogás, para generar la misma cantidad de energía eléctrica.



## **10. BIBLIOGRAFÍA.**

### **10.1. LIBROS Y PUBLICACIONES CONSULTADAS.**

Clesceri, L. S.; Greenberg, A. E.; Eaton A. D.; Rice E. W.: "Standard methods for the examination of water and wastewater", Washington: American Public Health Association, 2005.

Flotats, X.; Sarquella, L.: "Producció de biogás per codigestió anaeròbia". Col·lecció Quadern Pràctic. Número 1. 2008. Institut Català d'Energia (ICAEN).

Hernández Muñoz, A.: "Depuración de Aguas Residuales" Servicio de Publicaciones de las Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, 1994.

IDAE. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). Biomasa: Digestores anaerobios (2007).

Mendoza Roca, J. A. & Bes Piá, A.: "Diseño de los procesos de concentración en la línea de fangos de una EDAR", Universidad Politécnica, Artículo docente ETSII (58), 2013.

Mendoza Roca, J. A. & Bes Piá, A.: "Tratamiento de fangos de depuración de aguas residuales", Ed. Universidad Politécnica de Valencia, 2013.

Metcalf & Eddy: "Ingeniería de las Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización", Ed. McGraw-Hill, 1995.

Rodier, J.: "Análisis de Aguas: aguas naturales, aguas residuales, agua de mar". Omega, Barcelona, 1981.

Rojas Bermúdez, A. M.: "Caracterización y análisis de las corrientes de la línea de agua y de fango de una planta piloto de aguas residuales del grupo de investigación calagua", Universidad Politécnica, 2009.

### **10.2. PÁGINAS WEB DE INTERÉS Y REFERENCIAS DE FUENTES ELECTRÓNICAS.**

AENOR (Asociación Española de Normalización):

<http://www.aenor.es/>

BOE (Boletín Oficial del Estado):

<http://www.boe.es/>

CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas):

<http://www.ciemat.es/>

EPSAR (Entitat de Sanejament d'Aigües):

<http://www.epsar.gva.es/>

IDEA (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía):

<http://www.idae.es/>

MAPAMA (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Media Ambiente):

<http://www.mapama.gob.es/>

*Diseño de un digestor de fango anaerobio con producción de biogás. Estudio de cogeneración.*



# **DOCUMENTO II: PRESUPUESTO.**

*Diseño de un digestor de fango anaerobio con producción de biogás. Estudio de cogeneración.*

El coste para llevar a cabo el proyecto se muestra a continuación. En primer lugar, los presupuestos parciales para la línea de fango y la línea de gas, en la que ambos se encuentran divididas en capítulos. A partir de estos y del presupuesto de mano de obra se calculó el presupuesto de ejecución de material y el de contrata. Y, por último, se expone el presupuesto total.

## 1. PRESUPUESTOS PARCIALES.

Los presupuestos parciales están divididos en dos capítulos: línea de fango y línea de gas. A su vez, ambos se dividen en subcapítulos, diferenciando así las instalaciones principales y las secundarias.

**Tabla 1. Presupuesto Capítulo 1: Línea de fango. Subcapítulo 1.1: Instalaciones principales.**

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO (€)	IMPORTE (€)
<b>C1.1.1</b>	<b>ESPESADOR PRIMARIO.</b> Tanque de hormigón de planta circular. Consta de motorreductor, eje de transmisión, brazo de espesamiento, barredoras de fondo y aliviadero.	1	30.773,46	30.773,46
<b>C1.1.2</b>	<b>ESPESADOR SECUNDARIO.</b> Centrifuga la marca HUBER (modelo S-DRUM) o similar, con capacidad máxima de 30 m <sup>3</sup> /día.	1	14.969,69	14.969,69
<b>C1.1.3</b>	<b>CÁMARA DE MEZCLA.</b> Tanque de hormigón de planta circular. Consta sistema de agitación, toma-muestra y aliviadero.	1	23.919,49	23.919,49
<b>C1.1.4</b>	<b>DIGESTOR ANAEROBIO.</b> Tanque de hormigón, con sistema de agitación, toma muestra, rebose. Medidor de temperatura marca Rosemount o similar.	3	84.830,15	254.490,45
<b>C1.1.5</b>	<b>DESHIDRATACIÓN DE FANGO.</b> Centrifuga de la marca HUBER (modelo S-PRESS) o similar, con capacidad máxima de 10 m <sup>3</sup> /h.	1	23.939,39	23.939,39
<b>C1.1.6</b>	<b>TOLVA.</b> Marca Tecmoncade o similar; tipo tronco-piramidal, de 20 m <sup>3</sup> . Chapa con refuerzo y pilares base. Compuerta de accionamiento motorreductor eléctrico.	1	22.287,5	22.287,5
			<b>SUBTOTAL</b>	<b>370.379,98</b>

**Tabla 2. Presupuesto Capítulo 1: Línea de fango. Subcapítulo 1.2: Instalaciones secundarias.**

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO (€)	IMPORTE (€)
C.1.2.1	Válvula de control de flujo.	17	74,48	1.266,16
C.1.2.2	Bomba lobular. Impulsadora de caudal de fango.	7	2.000	14.000
C.1.2.3	Válvula dosificadora.	2	48,52	97,04
C.1.2.4	Caudalímetro	6	252,04	1.512,24
C.1.2.5	Medidor de temperatura	1	71	71
C.1.2.6	Conductímetro	1	154,68	154,68
C.1.2.7	Medidor de nivel	5	95,73	478,65
C.1.2.8	pH-metro	6	170	1.020
			<b>SUBTOTAL</b>	<b>18.599,77</b>

**Tabla 3. Presupuesto total Línea de fango.**

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO (€)	IMPORTE (€)
C.1.1	Línea de fango. Instalaciones principales.	1	370.379,98	370.379,98
C.1.2	Línea de fango. Instalaciones secundarias.	1	18.599,77	18.599,77
			<b>TOTAL</b>	<b>388.979,75</b>

**Tabla 4. Presupuesto Capítulo 2: Línea de gas. Subcapítulo 2.1: Instalaciones principales.**

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO (€)	IMPORTE (€)
C.2.1.1	<b>GASÓMETRO.</b> Gasómetro de doble membrana marca BIOMETSA o similar. Membrana externa e interna de poliéster con forro de PVC. Capacidad máxima de 2300 m <sup>3</sup> .	1	126.847,8	126.847,8
C.2.1.2	<b>ANTORCHA.</b> Antorcha de quemado de biogás. Marca Hofstetter (modelo IFL1c) o similar. Caudal máximo (Nm <sup>3</sup> /día) de 150.	1	8.162,92	8.162,92
C.2.1.3	<b>TORRE DE DESULFURACIÓN.</b> De la marca TECNIUM o similar. Capacidad máxima de 90 m <sup>3</sup> /h.	1	25.201	25.201
C.2.1.4	<b>MOTOR DE COGENERACIÓN.</b> Motor de cogeneración de la casa comercial JENBACHER (modelo Tipo 3-J320) o similar.	1	98.342,5	98.342,5
			<b>SUBTOTAL</b>	<b>258.554,22</b>

**Tabla 5. Presupuesto Capítulo 2: Línea de gas. Subcapítulo 2.2: Instalaciones secundarias.**

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO (€)	IMPORTE (€)
C.2.2.1	Válvula de control de flujo	4	74,48	297,92
C.2.2.2	Válvula reguladora de caudal	1	48,52	48,52
C.2.2.3	Válvula de seguridad	4	450	1800
C.2.2.4	Compresor de gas	2	1.560	3.120
C.2.2.5	Condensador y purga a la salida del digestor	3	2.112,5	6.337,5
C.2.2.6	Caudalímetro	4	262,04	1.048,16
			<b>SUBTOTAL</b>	<b>12.652,1</b>

**Tabla 6. Presupuesto total Línea de gas.**

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO (€)	IMPORTE (€)
C.2.1	Línea de gas. Instalaciones principales.	1	258.554,22	258.554,22
C.2.2	Línea de gas. Instalaciones secundarias.	1	12.652,1	12.652,1
			<b>TOTAL</b>	<b>271.206,32</b>

## **2. PRESUPUESTO DE MANO DE OBRA.**

A continuación, en la Tabla 7, se muestra el presupuesto de mano de obra, suponiendo para ello un periodo de 6 meses a jornada completa, es decir, 8 horas diarias durante 120 días.

**Tabla 7. Presupuesto por mano de obra.**

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (h)	PRECIO (€)	IMPORTE (€)
C3.1	Ingeniero Químico	960	30	28.800
C3.2	Oficial de 1ª	960	17,12	16.435,2
C3.3	Peón especializado	960	15,97	15.331,2
C3.4	Peón ordinario	960	15,8	15.168
			<b>TOTAL</b>	<b>75.734,4</b>

### 3. PRESUPUESTO POR EJECUCIÓN DE MATERIAL.

El coste de ejecución de material se calcula a partir del presupuesto de la línea de fango, del presupuesto de la línea de gas y del presupuesto de la mano de obra, es decir, a partir de los capítulos 1, 2 y 3, como se puede observar en la Tabla 8.

**Tabla 8. Presupuesto por ejecución de material.**

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO (€)	IMPORTE (€)
<b>C1</b>	LÍNEA DE GAS			388.979,75
<b>C2</b>	LÍNEA DE GAS	-	-	271.206,32
<b>C3</b>	MANO DE OBRA	-	-	75.734,40
			<b>TOTAL</b>	<b>735.920,47</b>

### 4. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA.

El presupuesto de ejecución por contrata se calcula teniendo en cuenta un 15% de gastos generales en base al presupuesto de ejecución de material, tal y como se observa en la Tabla 9.

**Tabla 9. Presupuesto de ejecución por contrata.**

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO (€)	IMPORTE (€)
<b>C4</b>	EJECUCIÓN DE MATERIAL	-	-	735.920,47
	GASTOS GENERALES (15%)	-	-	110.388,07
			<b>TOTAL</b>	<b>846.308,54</b>

### 5. PRESUPUESTO TOTAL.

Por último, se aplica un 25% de IVA al presupuesto por ejecución por contrata, teniendo así un presupuesto total de **UN MILLON CINCUENTA Y SIETE MIL OCHOCIENTOS OCHENTA Y CINCO euros CON SESENTA Y OCHO céntimos.**

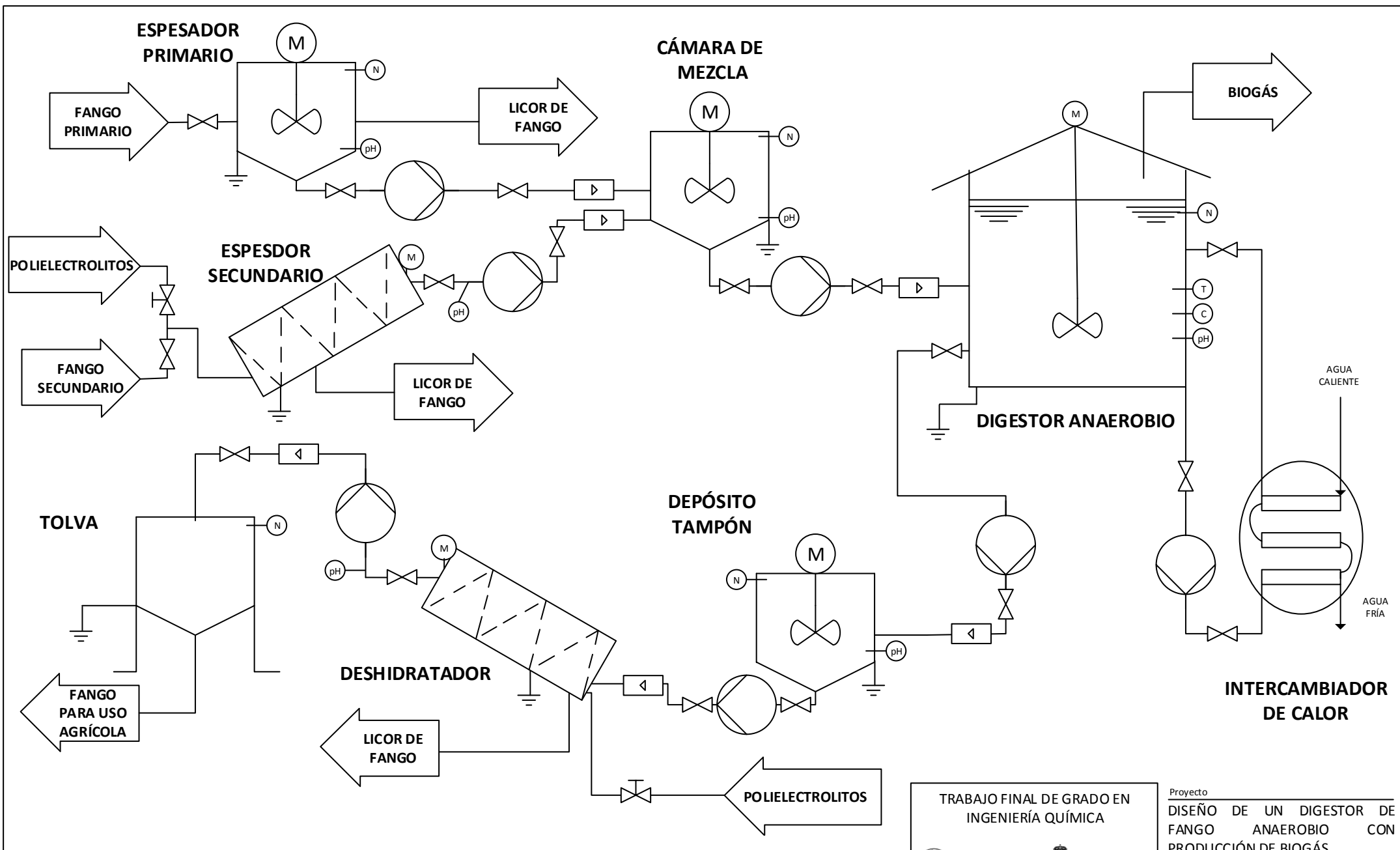
**Tabla 10. Presupuesto total.**

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO (€)	IMPORTE (€)
<b>C5</b>	EJECUCIÓN POR CONTRATA	-	-	846.308,54
	IVA (21%)	-	-	177.724,79
			<b>TOTAL</b>	<b>1.024.033,33</b>

# **DOCUMENTO II: PLANOS.**

*Diseño de un digestor de fango anaerobio con producción de biogás. Estudio de cogeneración.*





**Legenda de controladores**

(N) Medidor de nivel	(C) Conductímetro
(T) Medidor de temperatura	(⊗) Manómetro
(pH) pH-metro	

**Legenda de equipos**

(V) Válvula	(TM) Toma-muestra
(VS) Válvula de seguridad	(▶) Caudalímetro
(VD) Válvula de dosificadora	(⏚) Toma a tierra

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALÈNCIA

Proyecto

DISEÑO DE UN DIGESTOR DE FANGO ANAEROBIO CON PRODUCCIÓN DE BIOGÁS. ESTUDIO DE COGENERACIÓN.

Fecha

Julio 2017

Plano

Diagrama de flujo de la línea de fangos

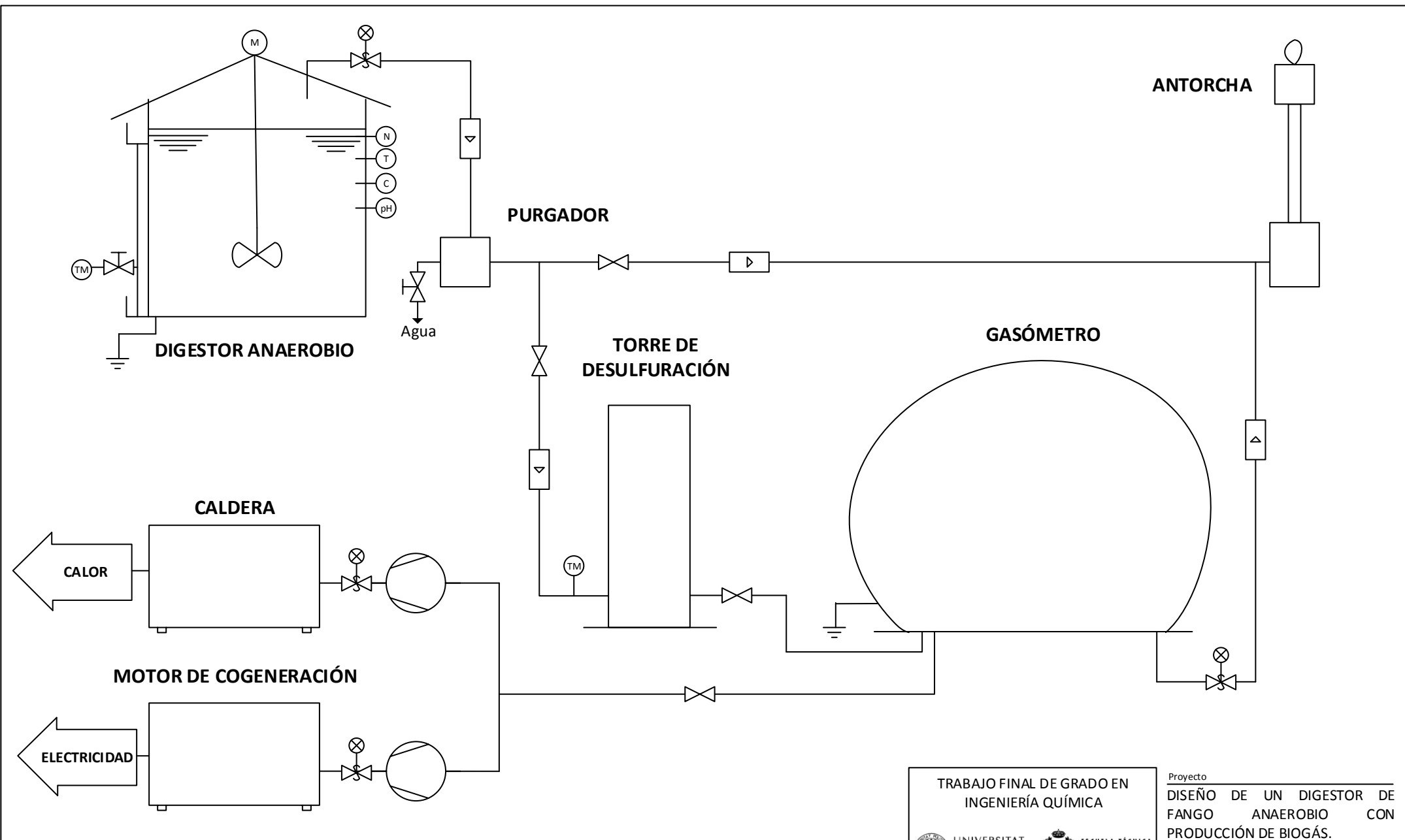
Nº Plano

1

Daniela Lo Guzzo

Autor proyecto





**Leyenda de controladores**

- (N) Medidor de nivel
- (T) Medidor de temperatura
- (pH) pH-metro
- (C) Conductímetro
- (⊗) Manómetro

**Leyenda de equipos**

- (⋈) Válvula
- (⋈) Válvula de seguridad
- (▷) Caudalímetro
- (TM) Toma-muestra
- (○) Supresor de gas
- (⏏) Toma a tierra

TRABAJO FINAL DE GRADO EN  
INGENIERÍA QUÍMICA



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALÈNCIA

Daniela Lo Guzzo  
Autor proyecto

Proyecto

DISEÑO DE UN DIGESTOR DE FANGO ANAEROBIO CON PRODUCCIÓN DE BIOGÁS. ESTUDIO DE COGENERACIÓN.

Fecha

Julio 2017

Plano

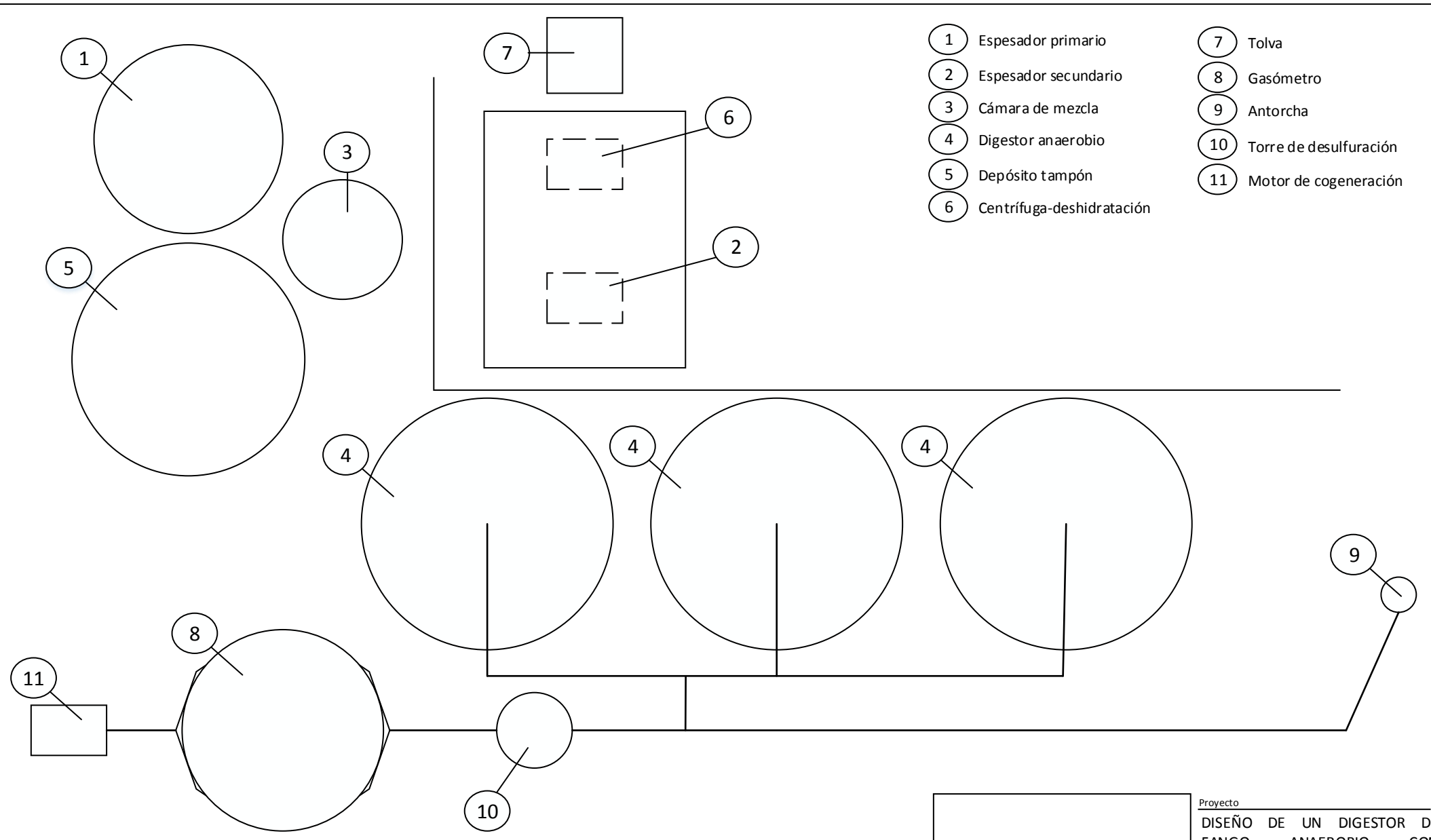
Diagrama de flujo de la línea de biogás

Nº Plano

2



- 1 Espesador primario
- 2 Espesador secundario
- 3 Cámara de mezcla
- 4 Digestor anaerobio
- 5 Depósito tampón
- 6 Centrífuga-deshidratación
- 7 Tolva
- 8 Gasómetro
- 9 Antorcha
- 10 Torre de desulfuración
- 11 Motor de cogeneración




 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
 
 ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA

Daniela Lo Guzzo

Autor proyecto

Proyecto  
**DISEÑO DE UN DIGESTOR DE FANGO ANAEROBIO CON PRODUCCIÓN DE BIOGÁS. ESTUDIO DE COGENERACIÓN.**  
 Fecha  
 Julio 2017  
 Plano  
 Diagrama de flujo de la línea de fangos  
 Nº Plano  
 3





**DOCUMENTO III:**

**ANEXOS.**

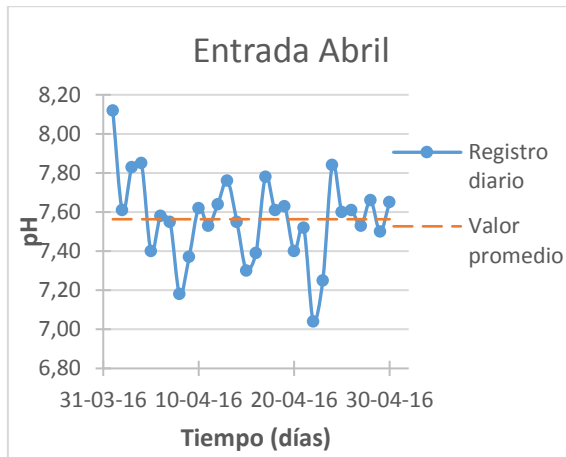




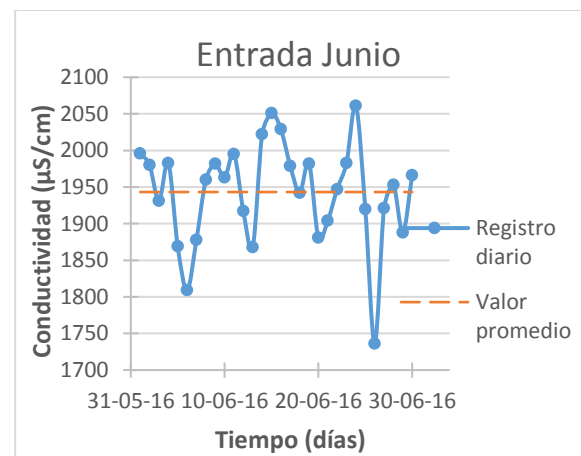
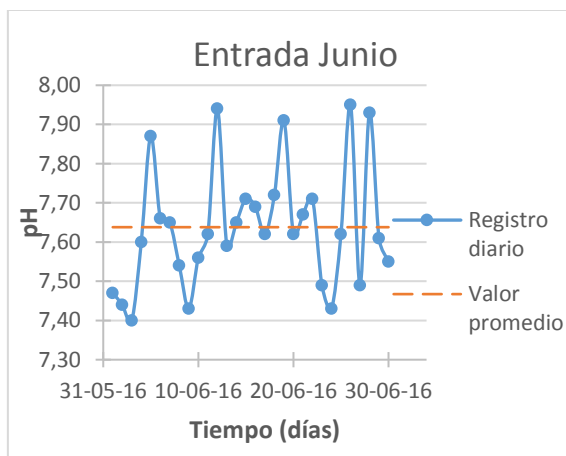
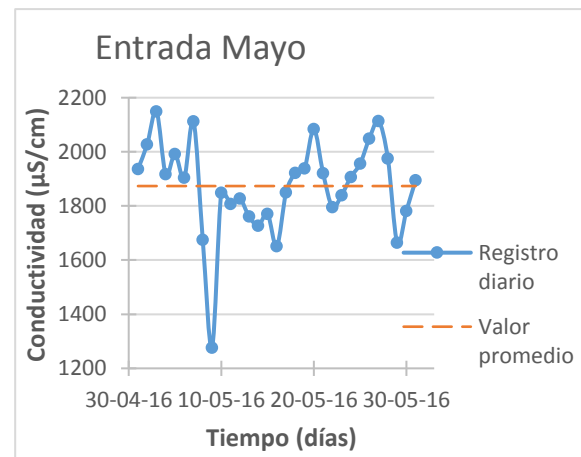
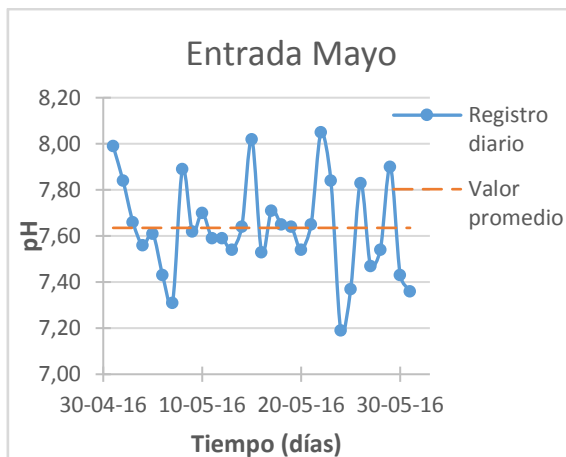
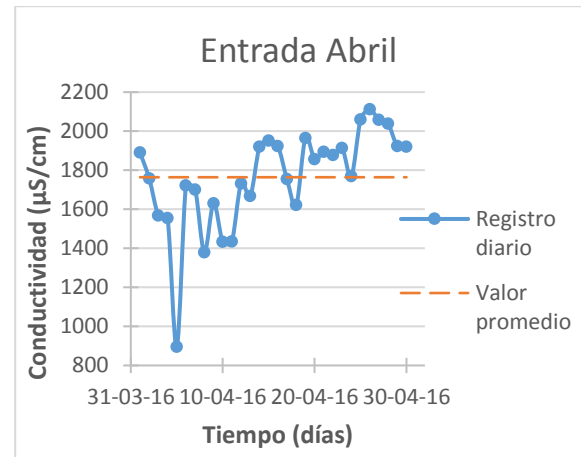
# ANEXO 1. REPRESENTACIONES DE LOS PARÁMETROS MEDIDOS EN LOS DISTINTOS PUNTOS DE LA EDAR.

## 1. RESULTADOS ANALÍTICA DE LA LÍNEA DE AGUA.

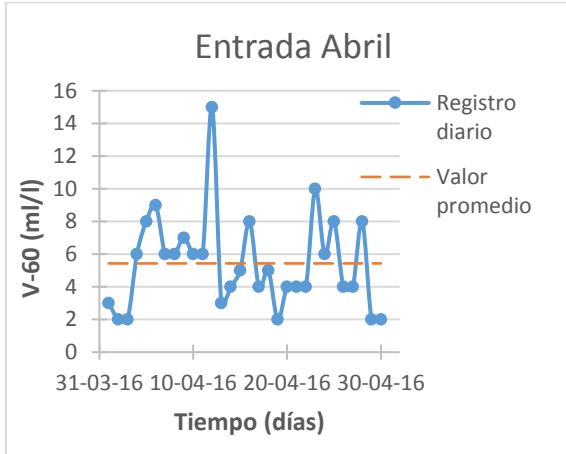
### 1.1. Resultado de pH.



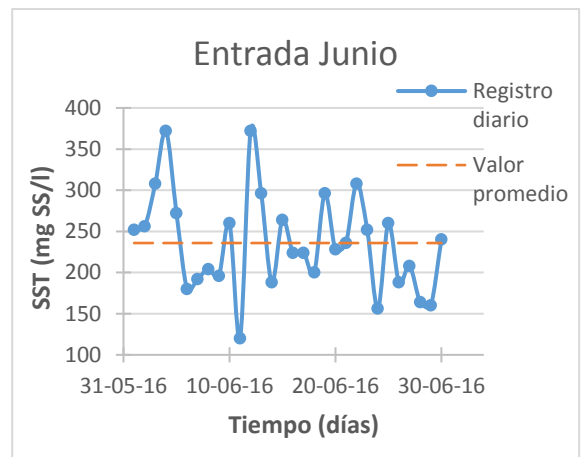
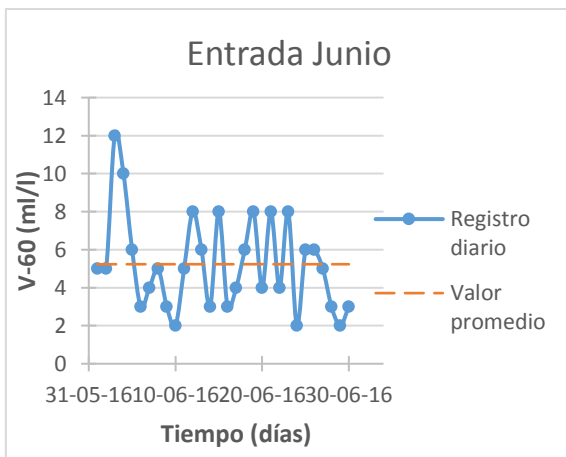
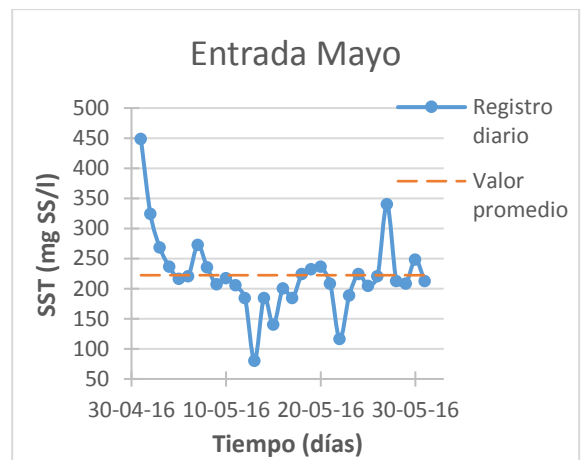
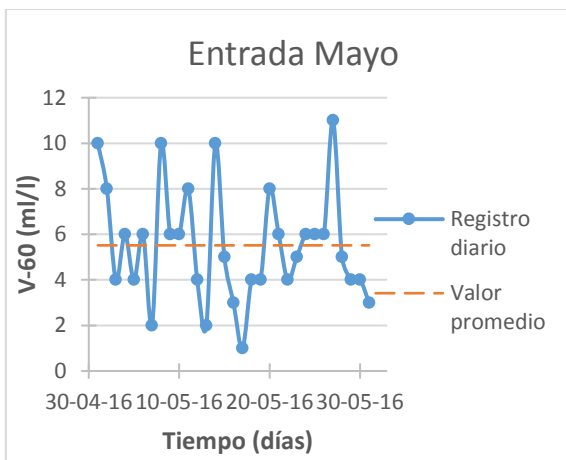
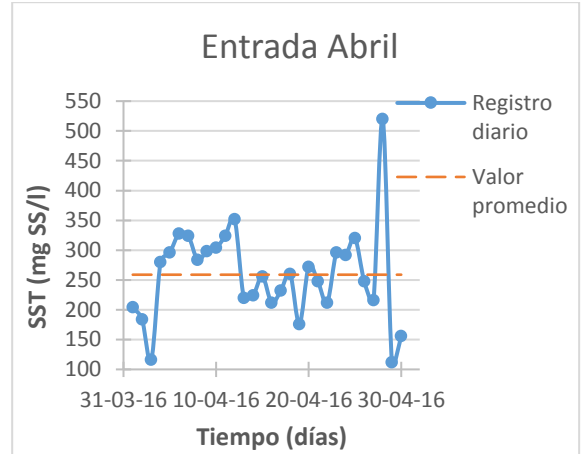
### 1.2. Resultados de conductividad.



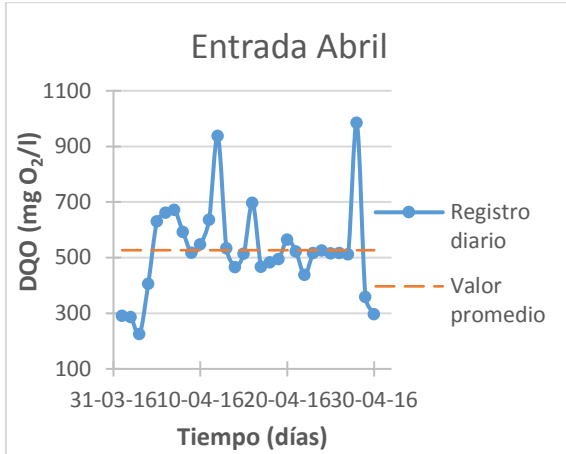
**1.3. Resultados de V-60.**



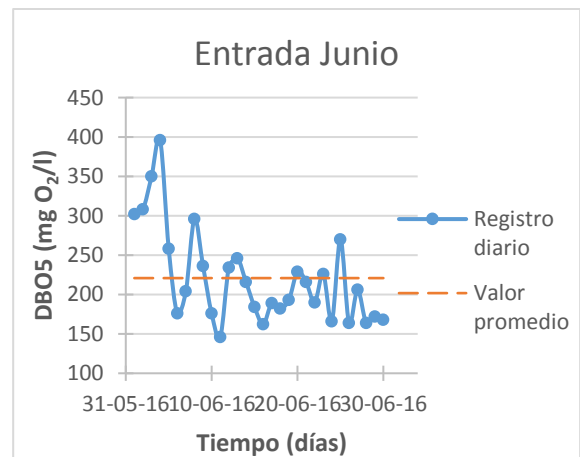
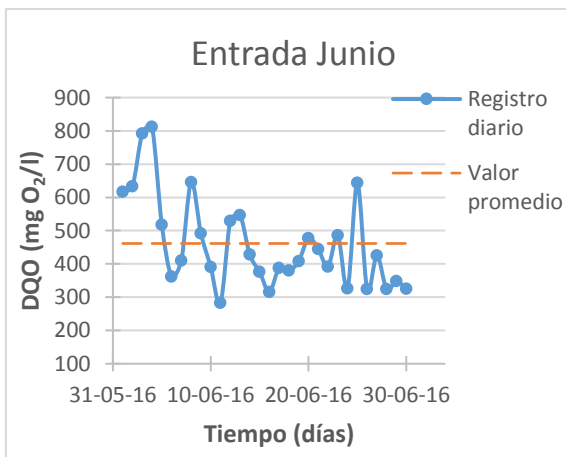
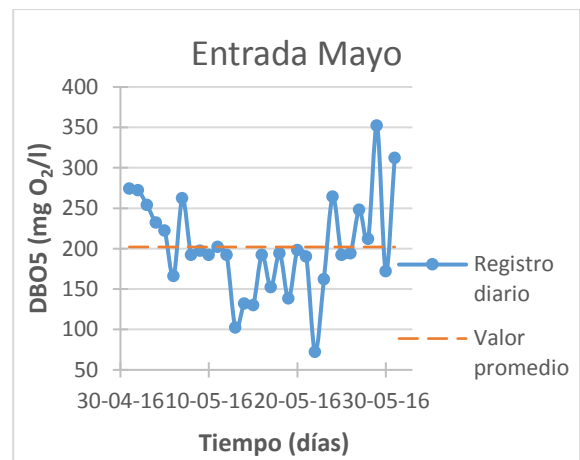
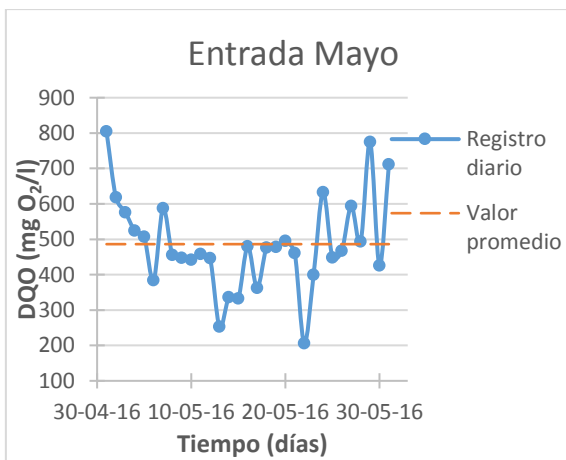
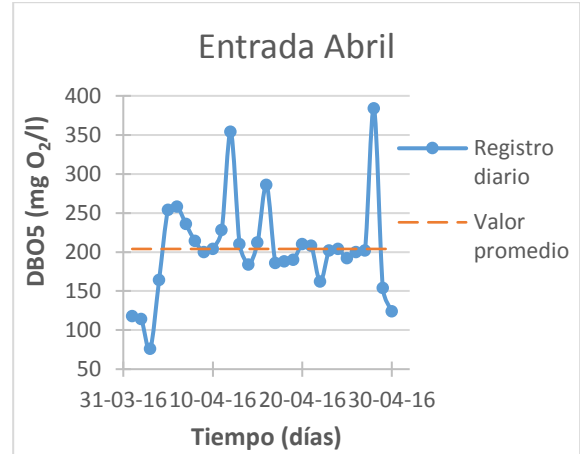
**1.4. Resultados de SST.**



### 1.5. Resultados de DQO.

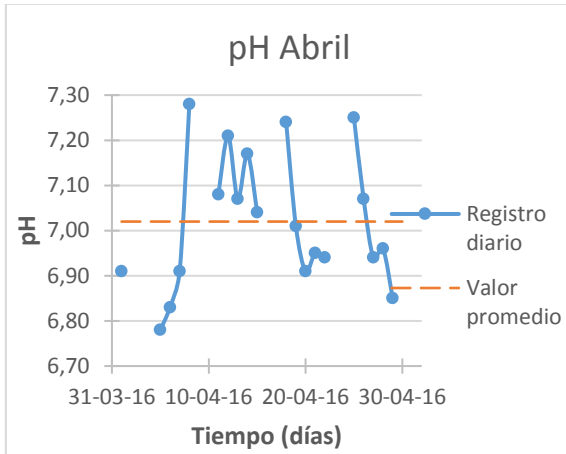


### 1.6. Resultados de DBO5.

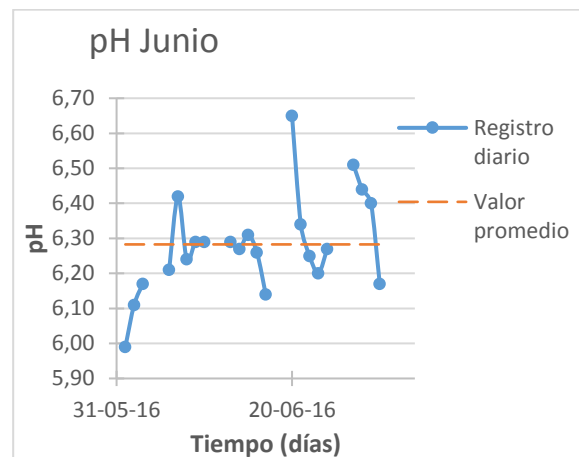
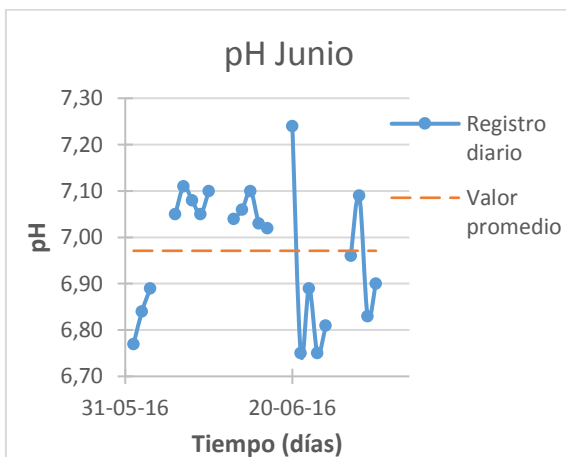
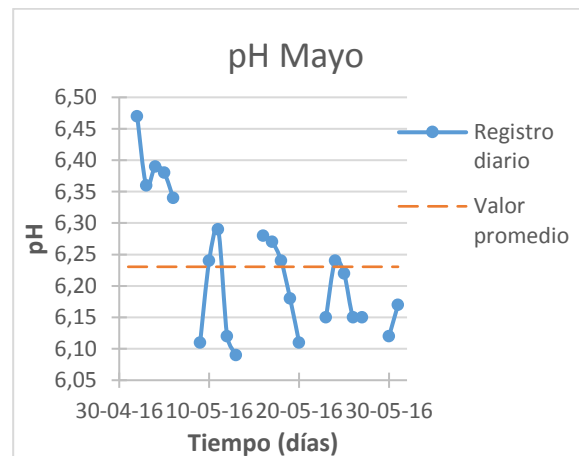
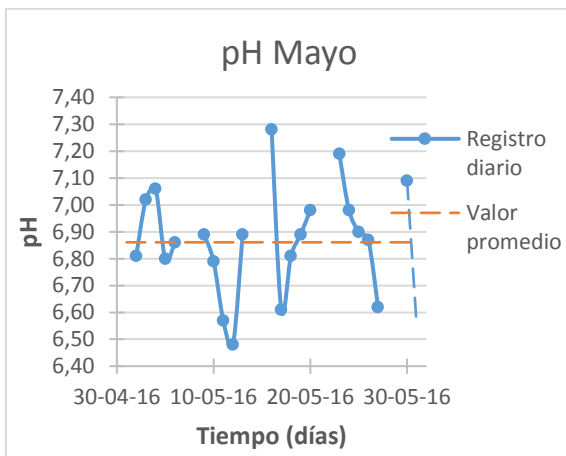
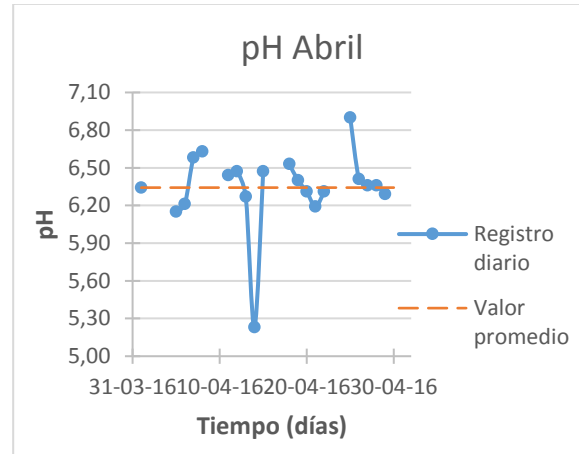


## 2. RESULTADOS ANALÍTICAS DE LA LÍNEA DE FANGO.

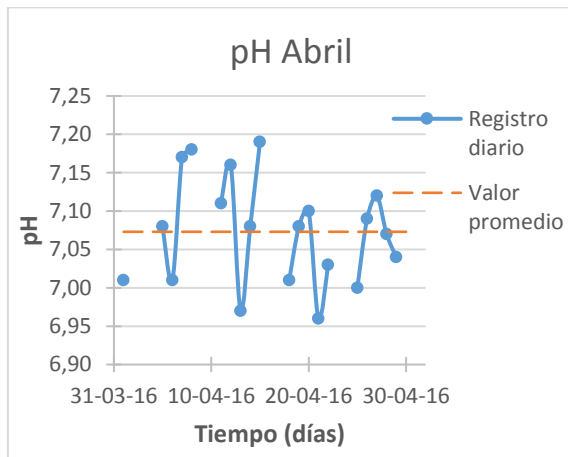
### 2.1. Resultados de fango primario.



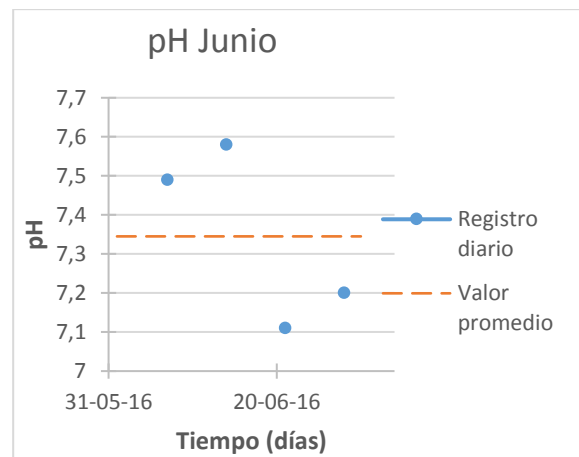
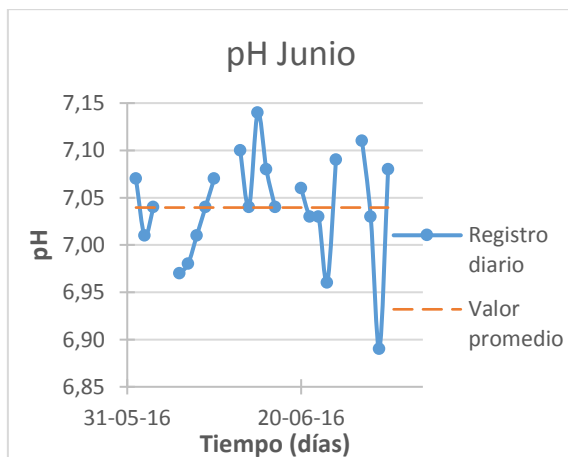
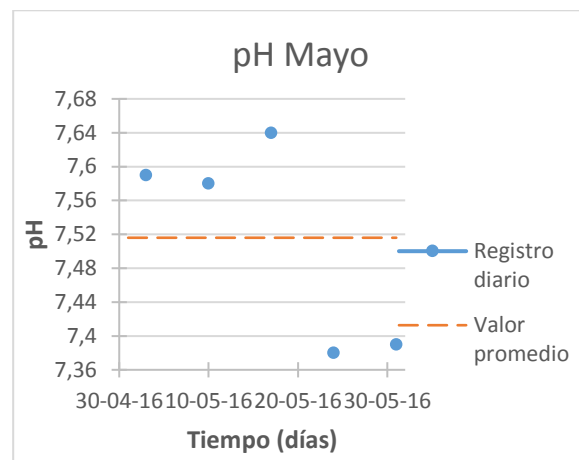
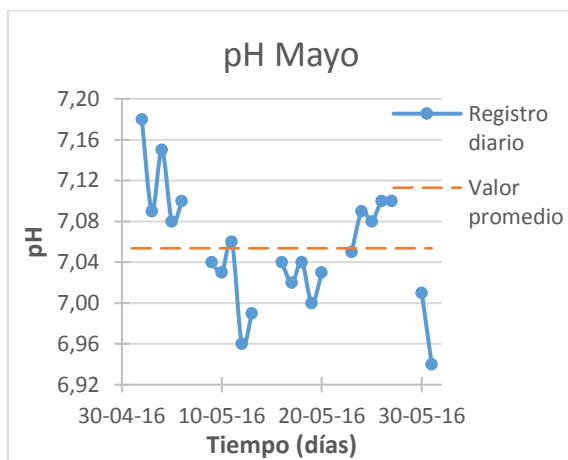
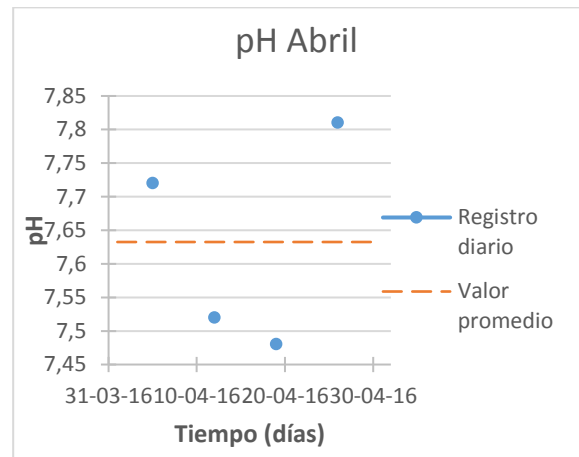
### 2.2. Resultados de fango primario espesado.



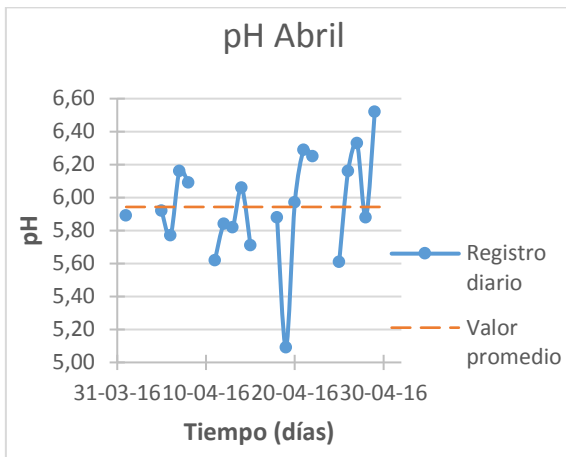
### 2.3. Resultados de fango en exceso.



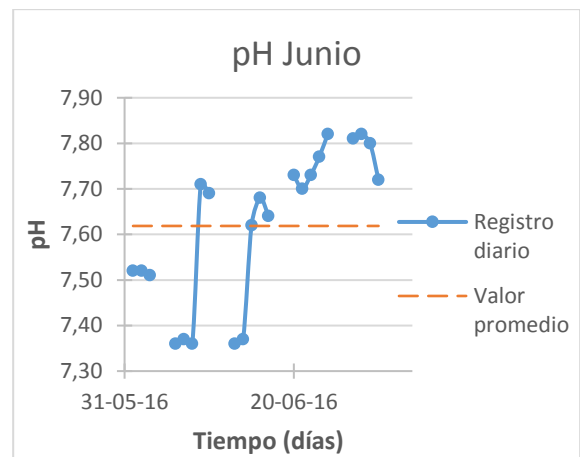
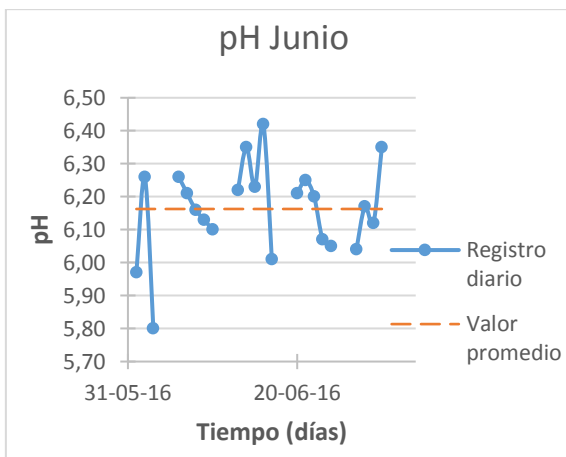
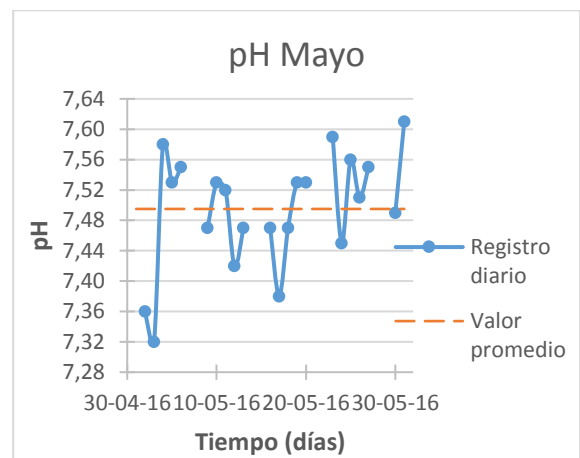
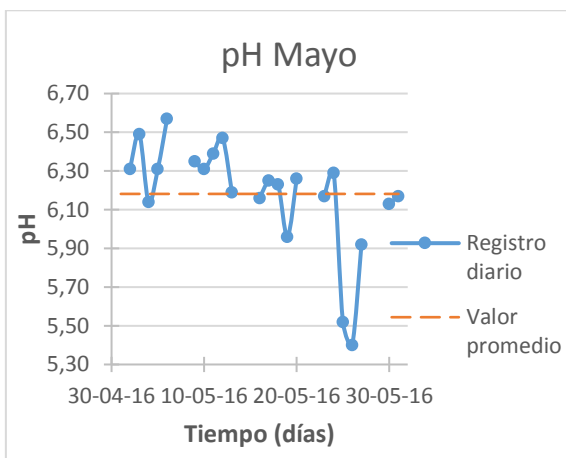
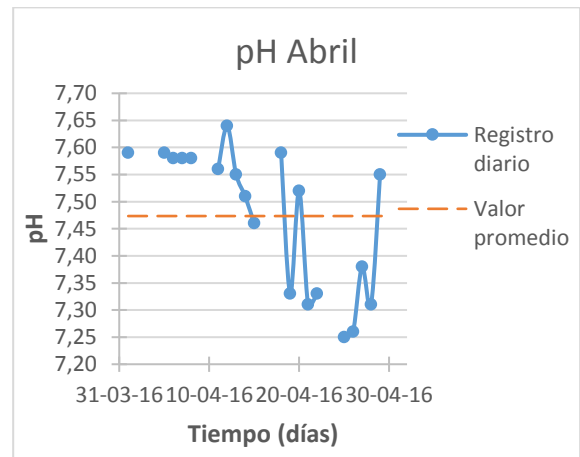
### 2.4. Resultados de fango en exceso espesado.



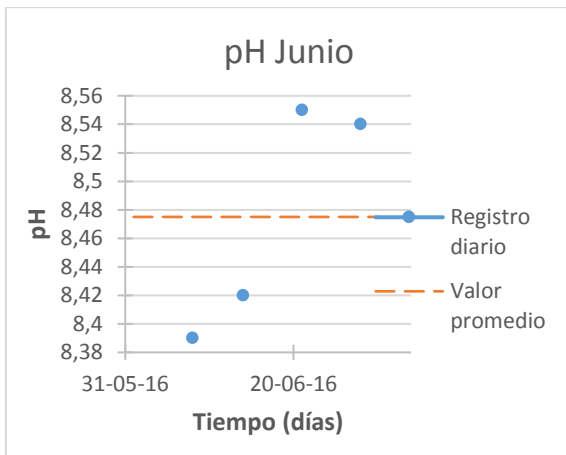
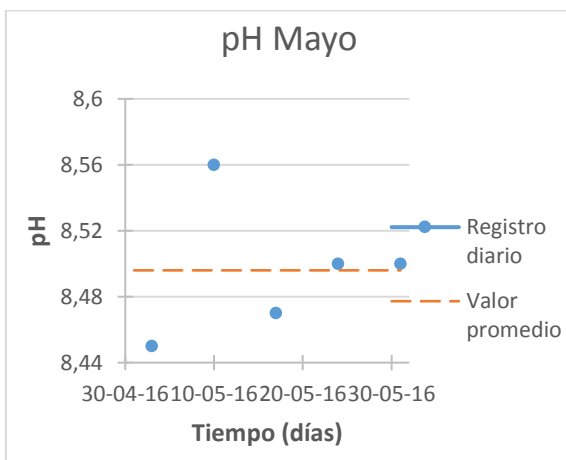
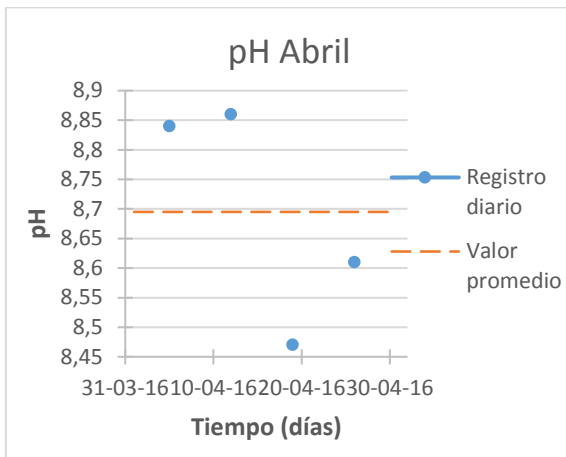
**2.5. Resultados de fango de mezcla  
digestión.**



**2.6. Resultados de fango digerido.**



## 2.7. Resultados de fango deshidratado.

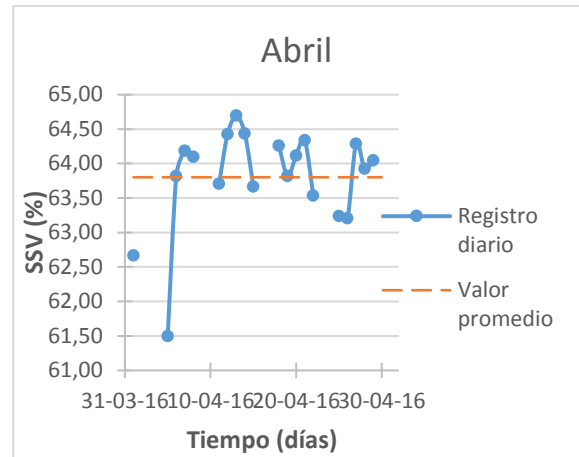
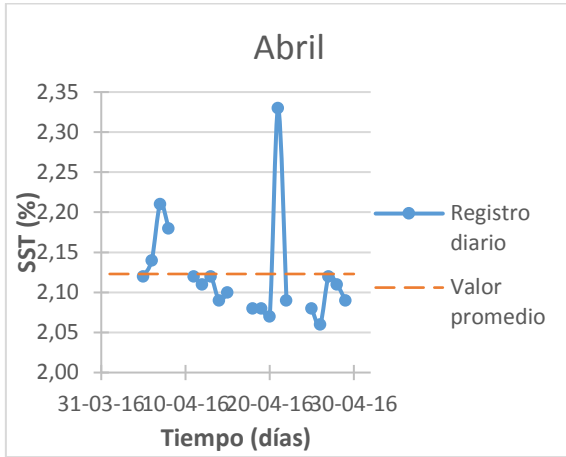




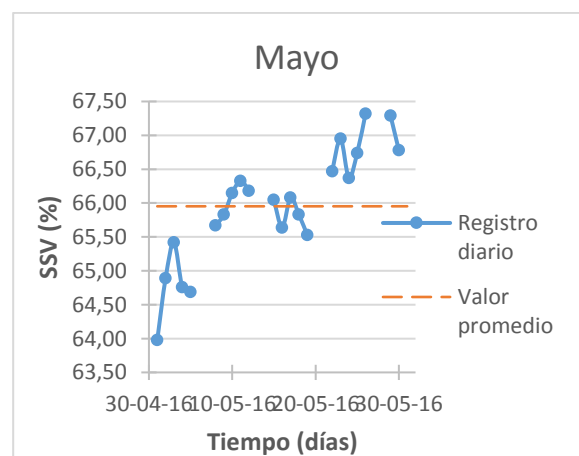
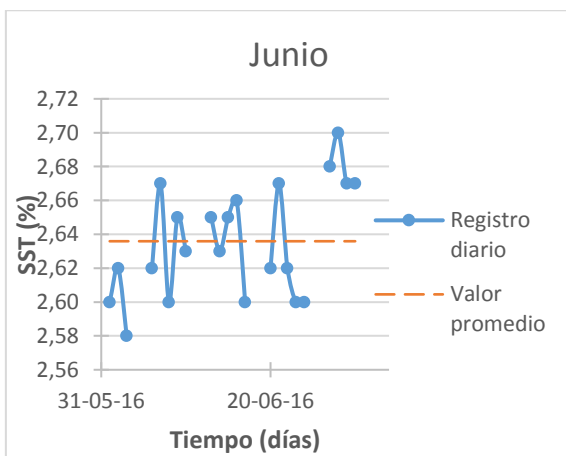
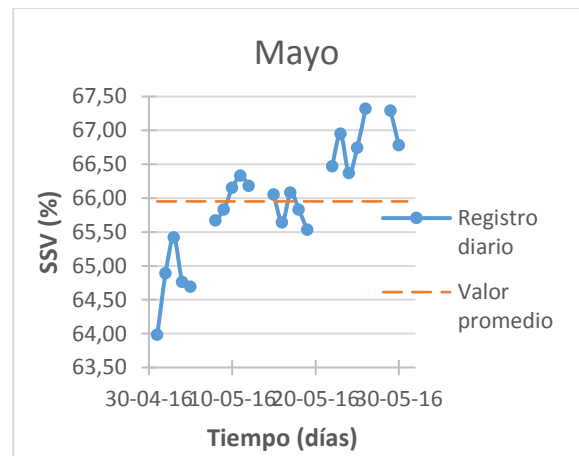
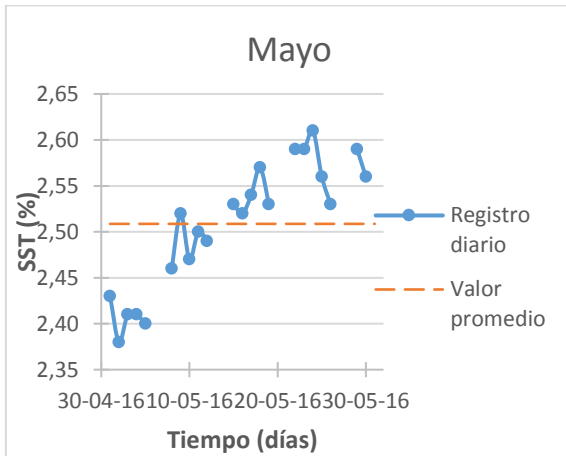
### 3. RESULTADOS ANALÍTICA DE DIGESTIÓN.

#### 3.1. Resultados del Digestor A.

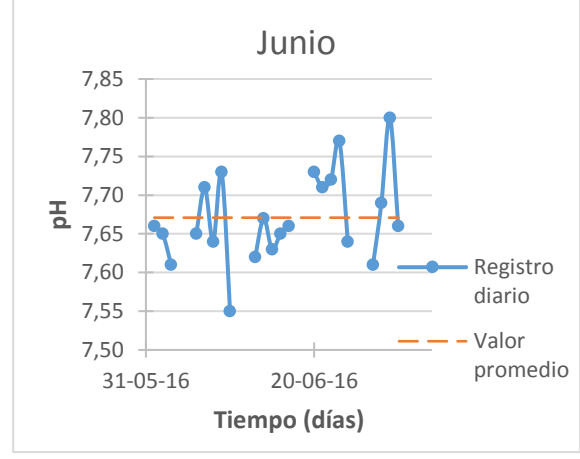
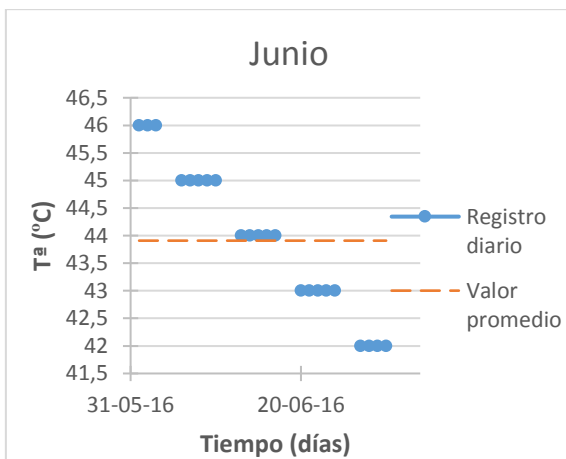
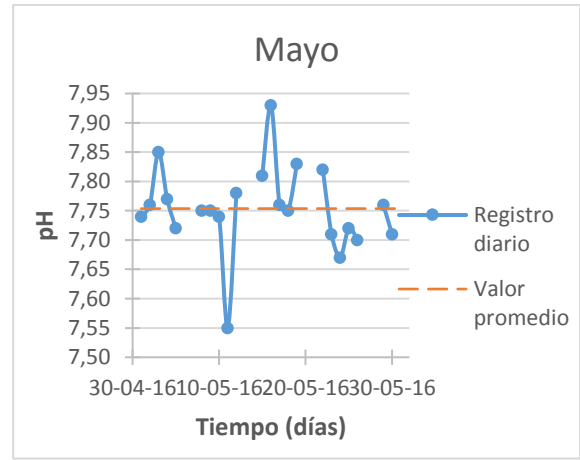
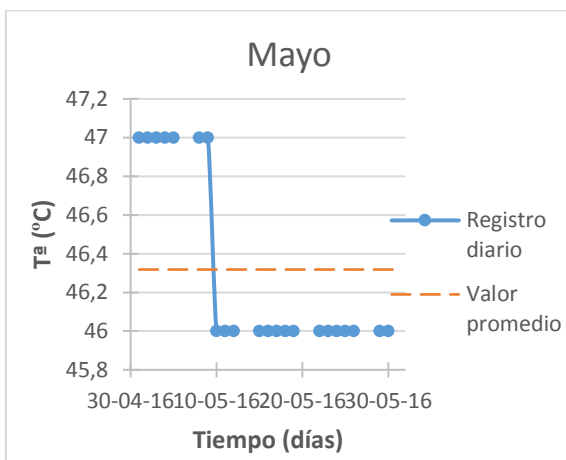
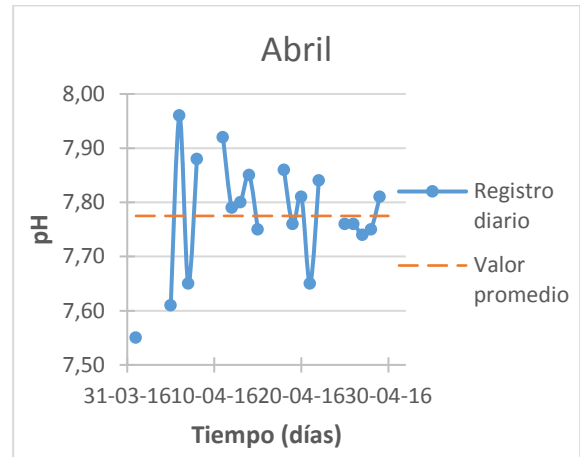
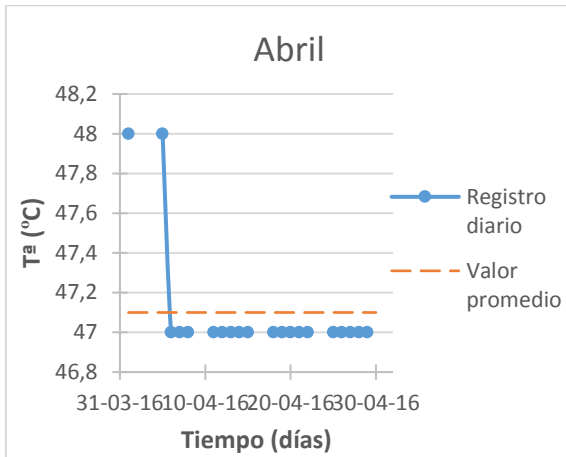
##### 3.1.1. Resultados de SST.



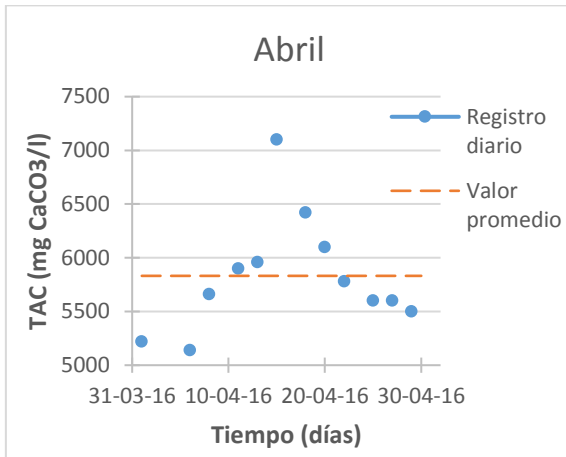
##### 3.1.2. Resultados de SSV.



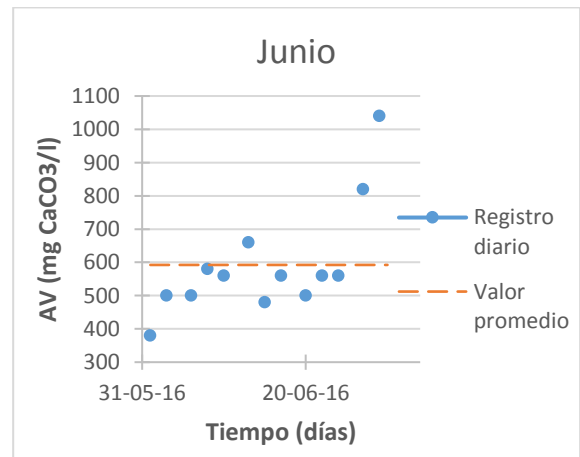
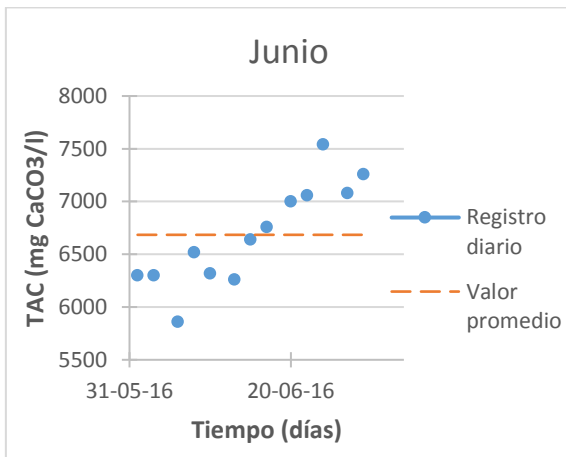
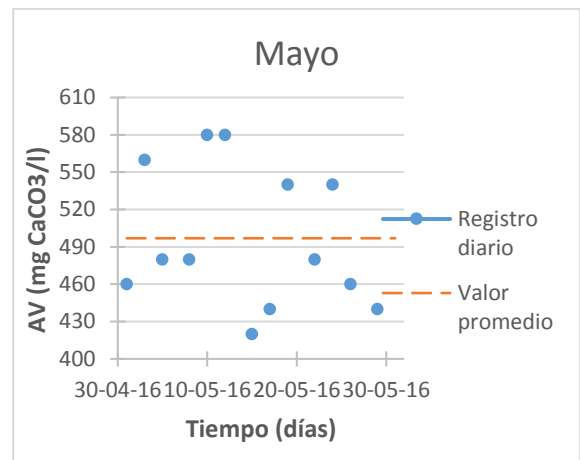
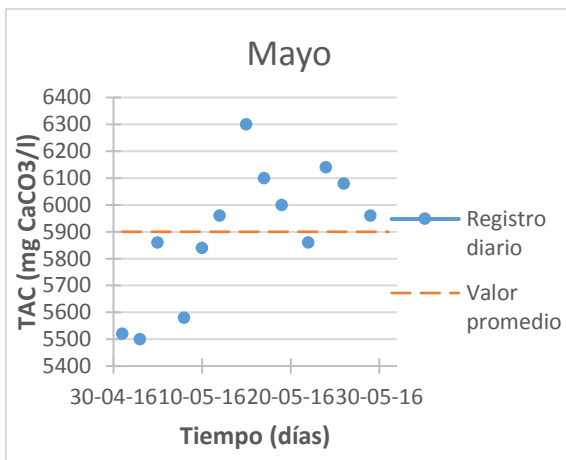
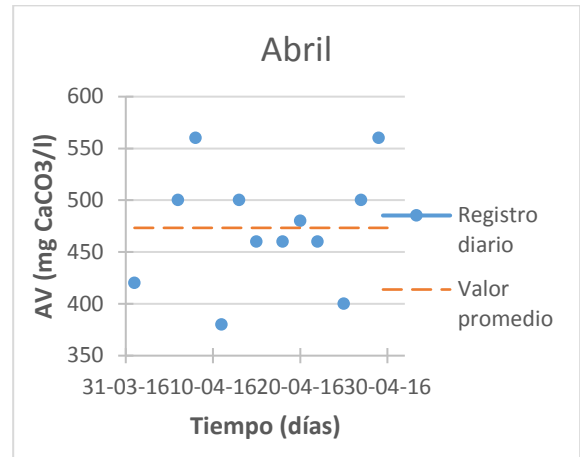
### 3.1.3. Resultados de temperatura.



### 3.1.5. Resultados de TAC.



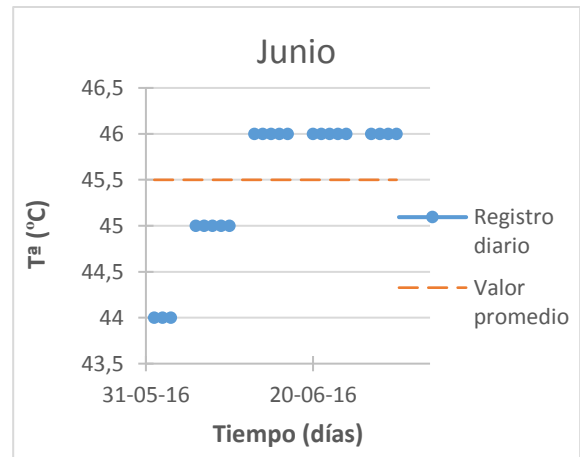
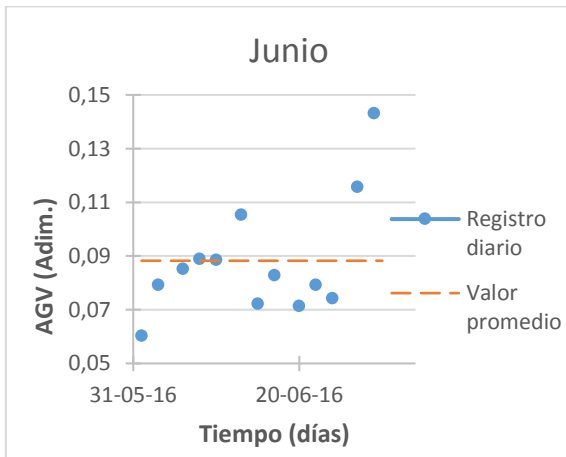
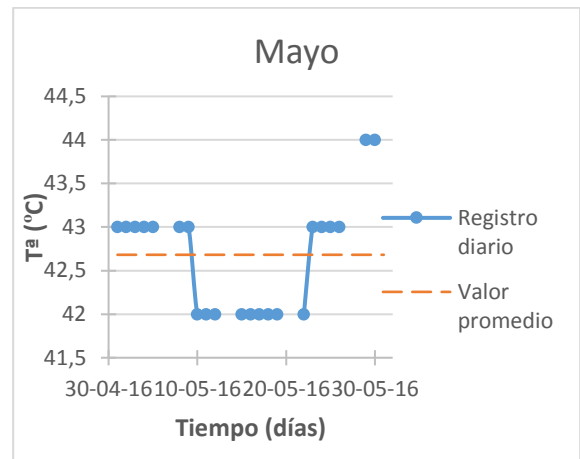
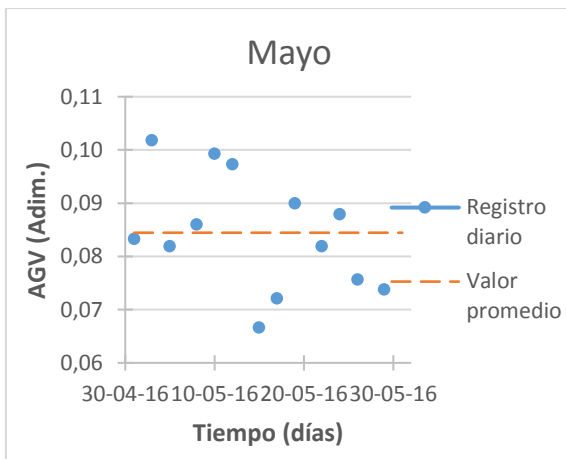
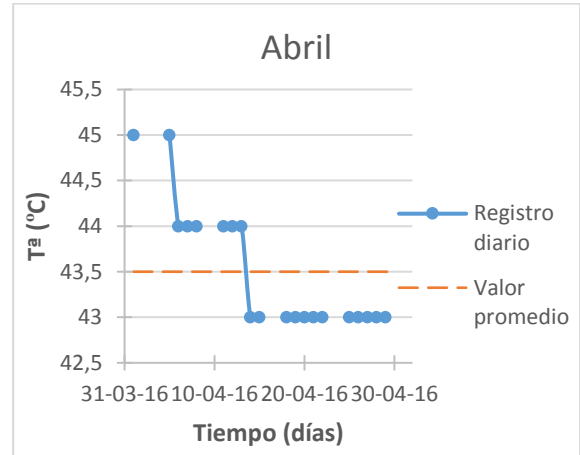
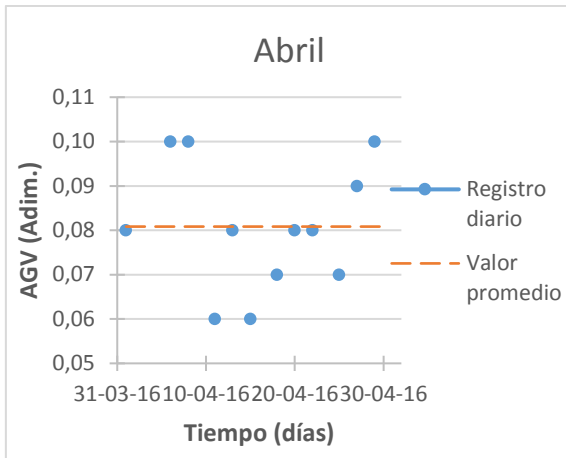
### 3.1.6. Resultados de AV.



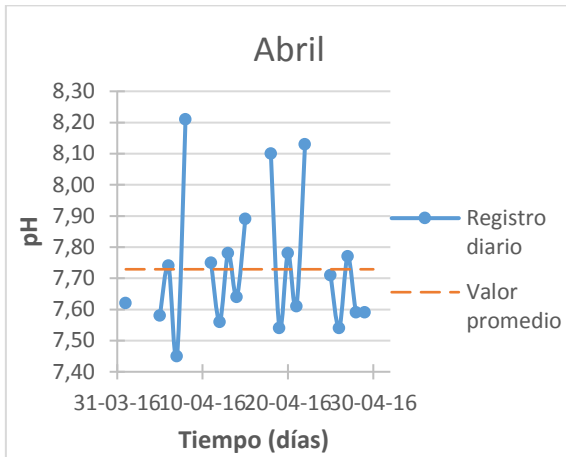
### 3.2. Resultados del Digestor B.

#### 3.2.1. Resultados de temperatura.

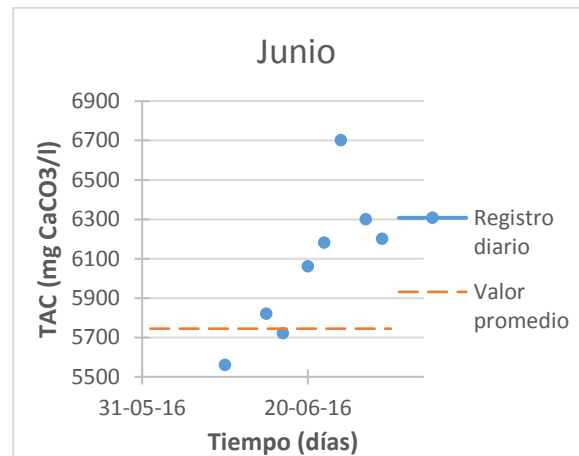
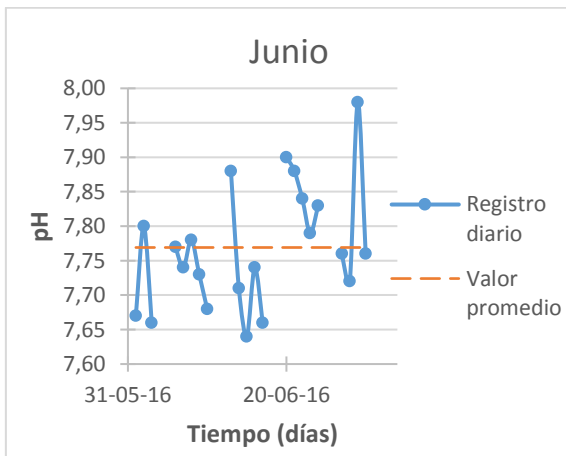
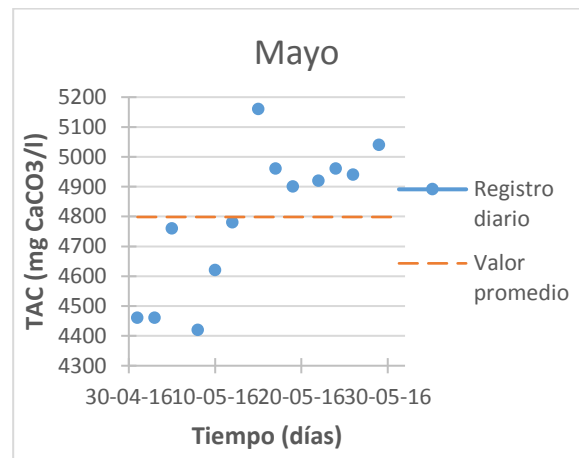
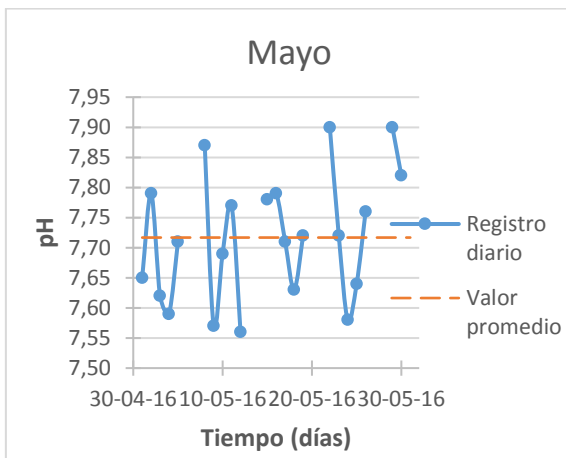
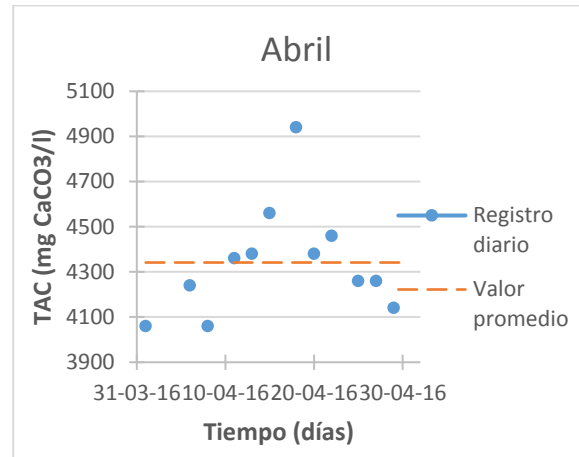
#### 3.1.7. Resultados de AGV.



### 3.2.2. Resultados de pH.



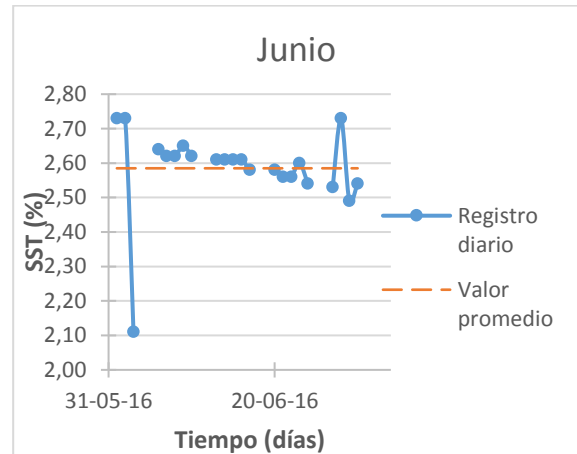
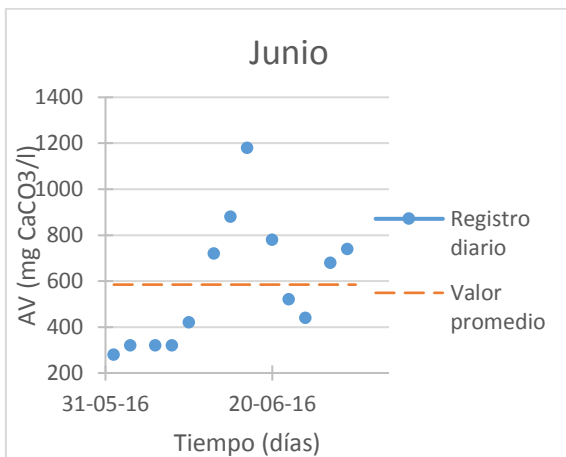
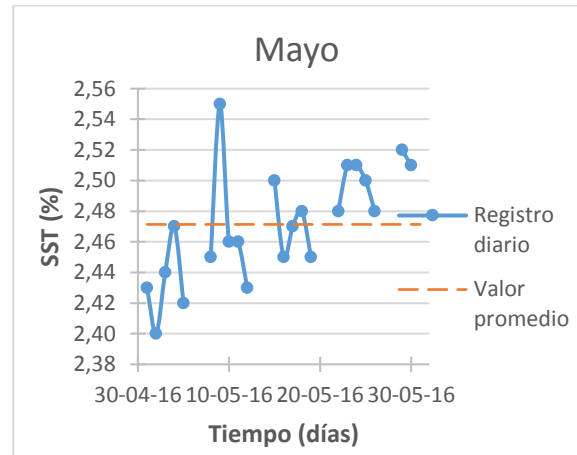
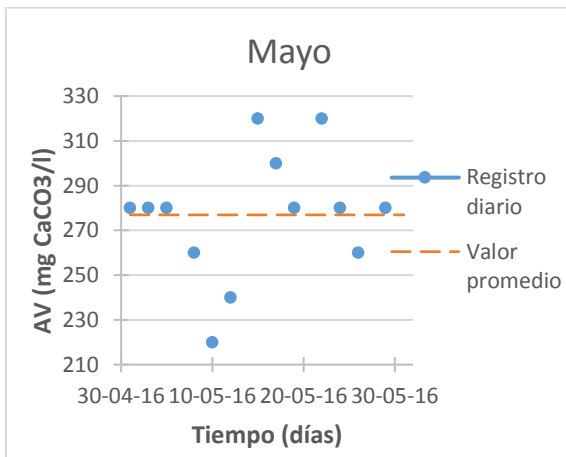
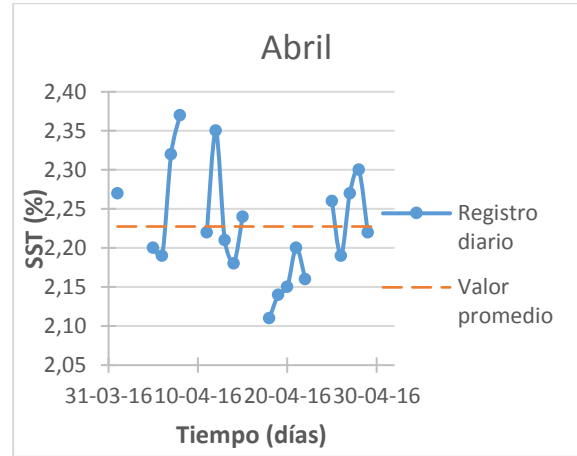
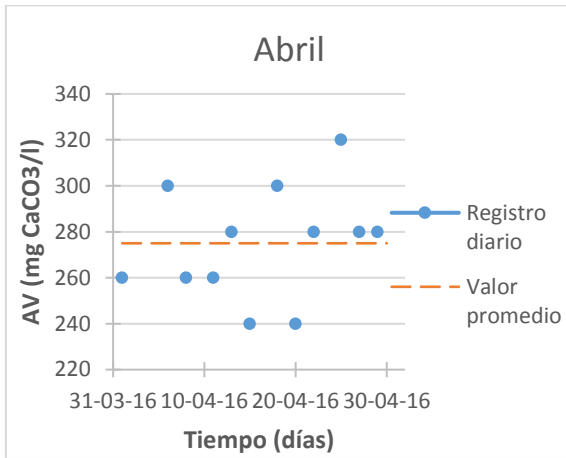
### 3.2.3. Resultados de TAC.



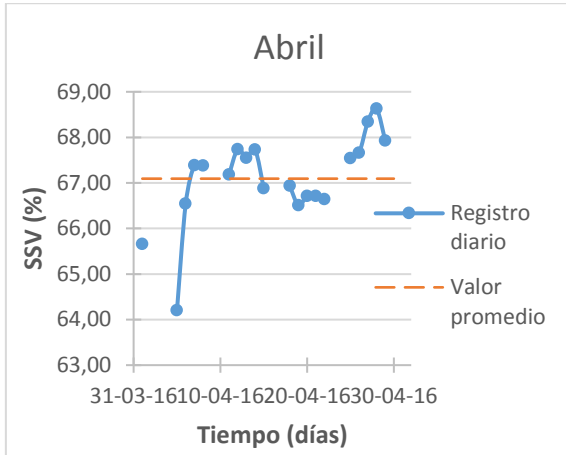
### 3.3. Resultados del Digestor C.

#### 3.3.1. Resultados de SST.

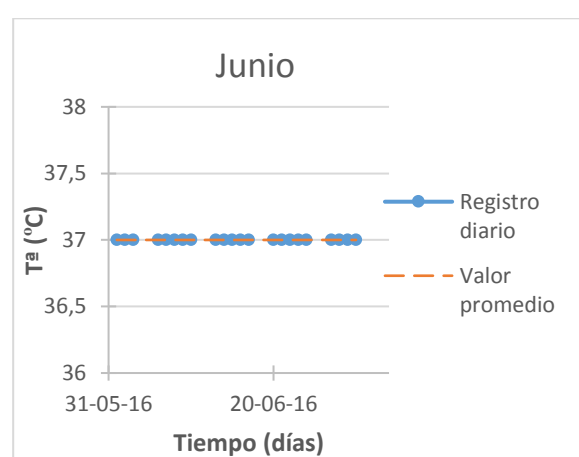
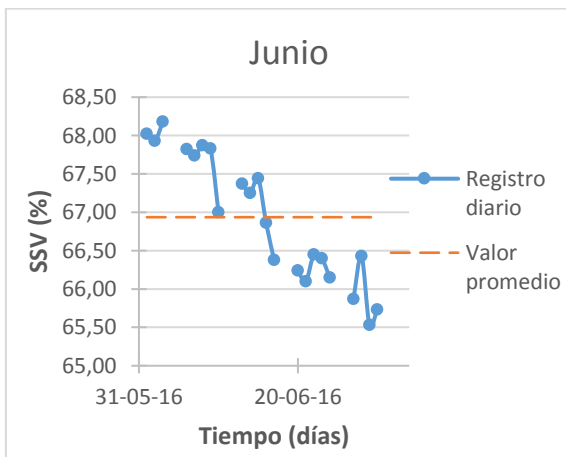
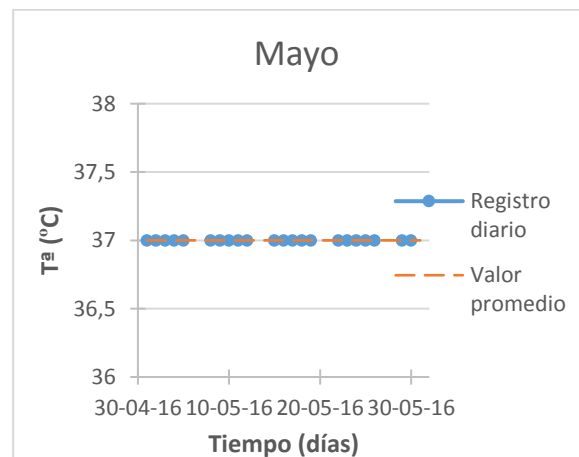
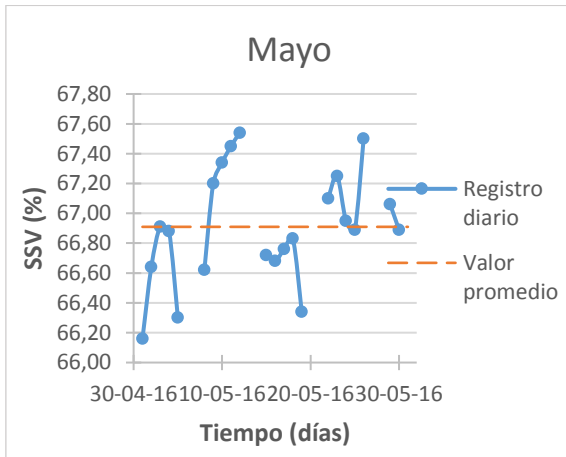
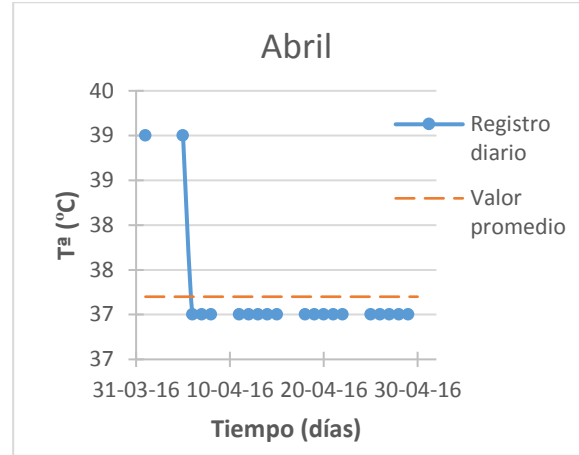
#### 3.2.4. Resultados de AV.



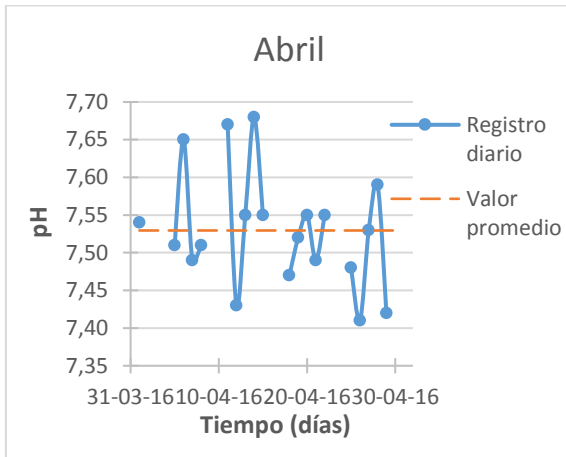
### 3.3.2. Resultados de SSV.



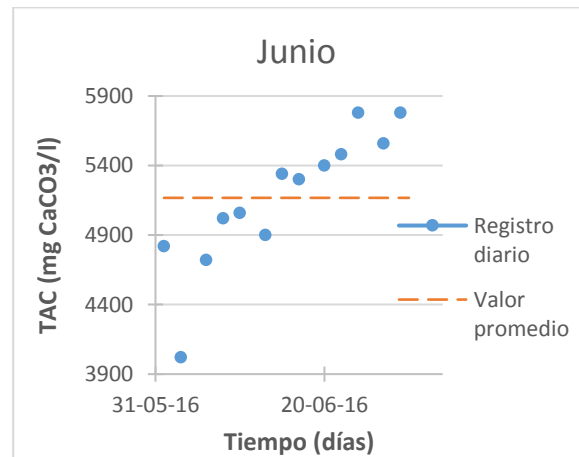
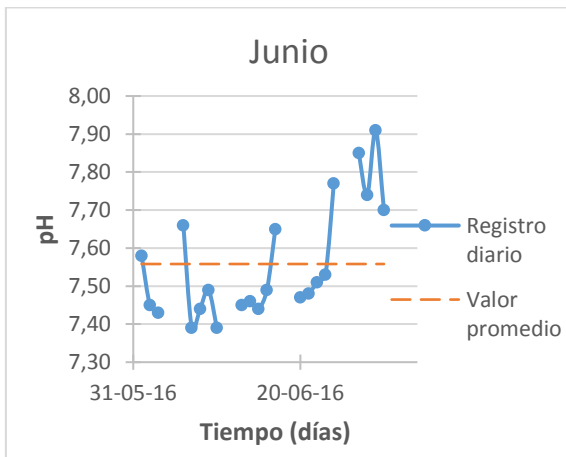
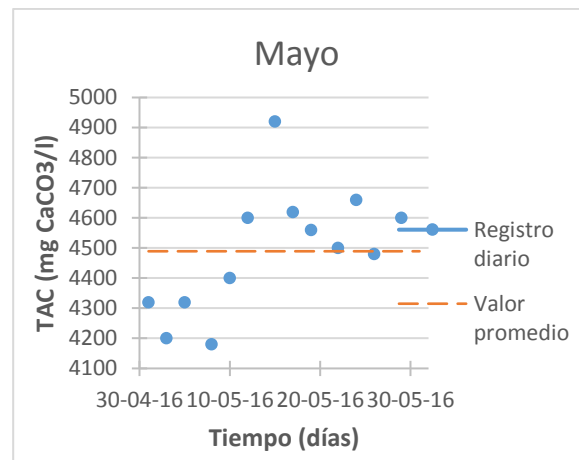
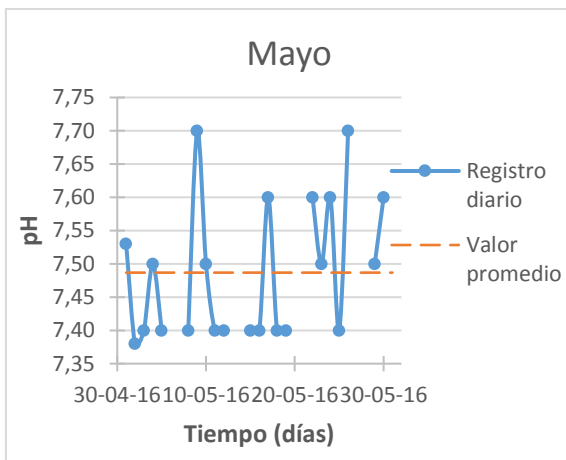
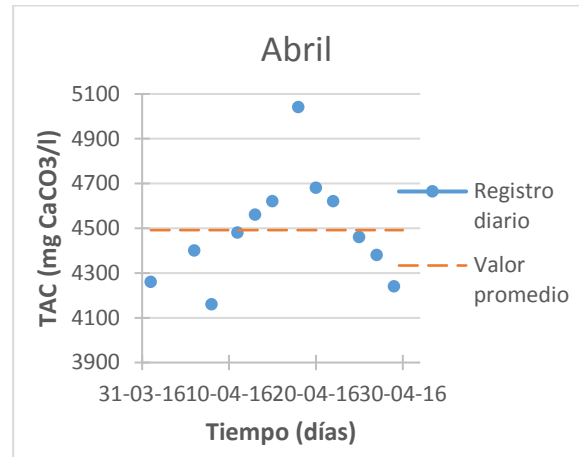
### 3.3.3. Resultados de temperatura.



### 3.3.4. Resultados de pH.

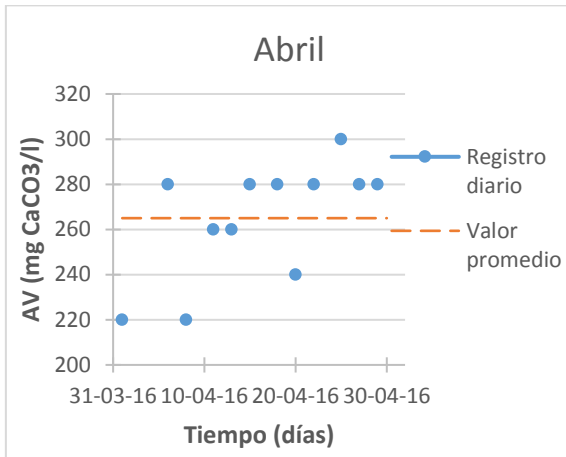


### 3.3.5. Resultados de TAC.

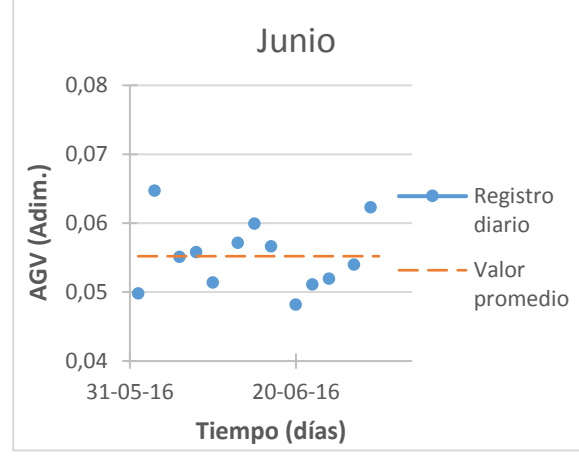
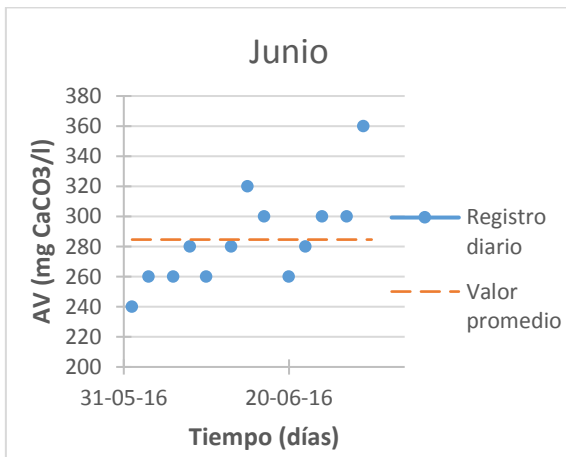
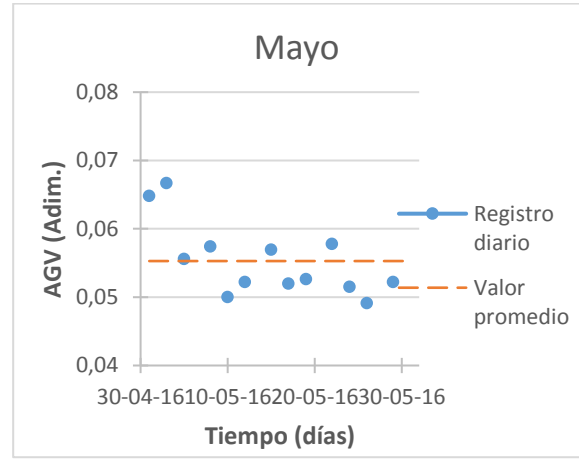
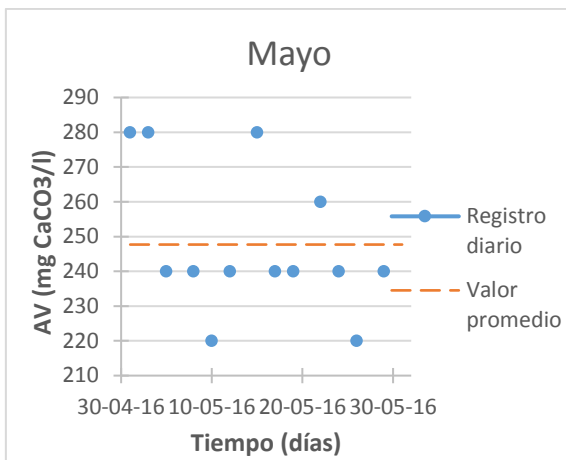
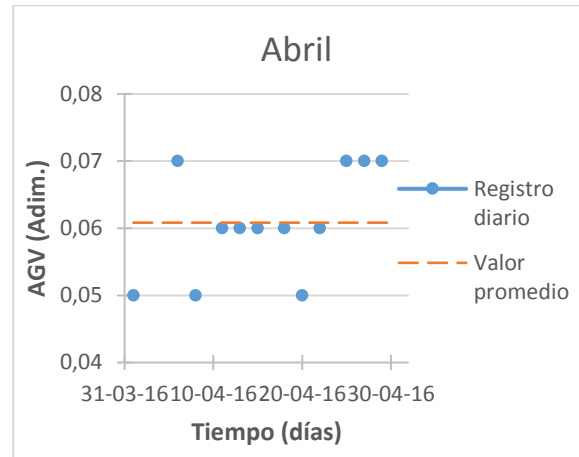




### 3.3.6. Resultados de AV.

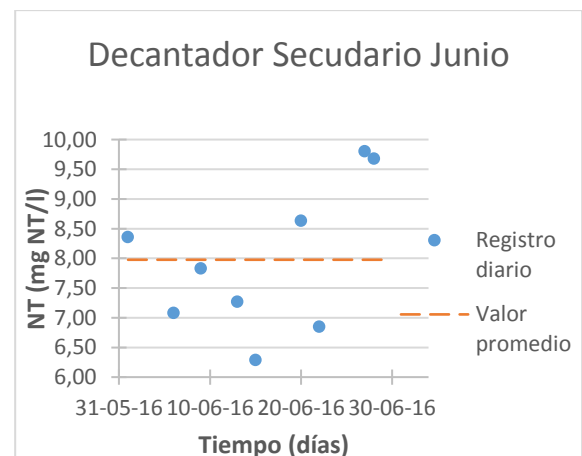
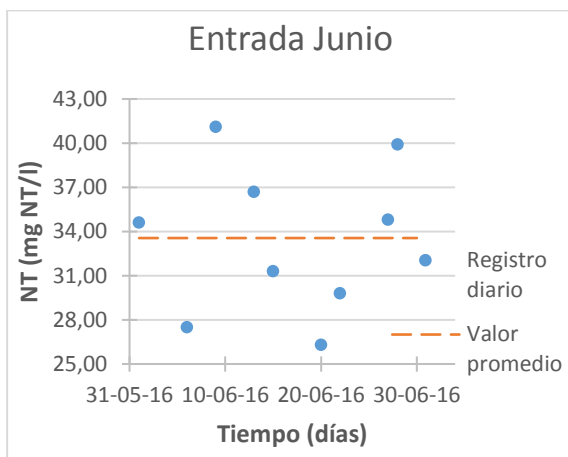
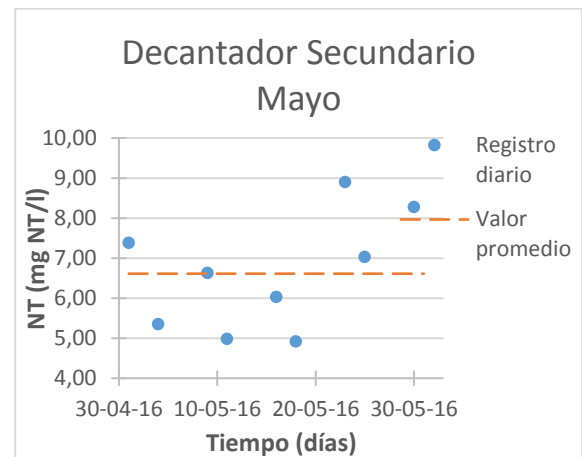
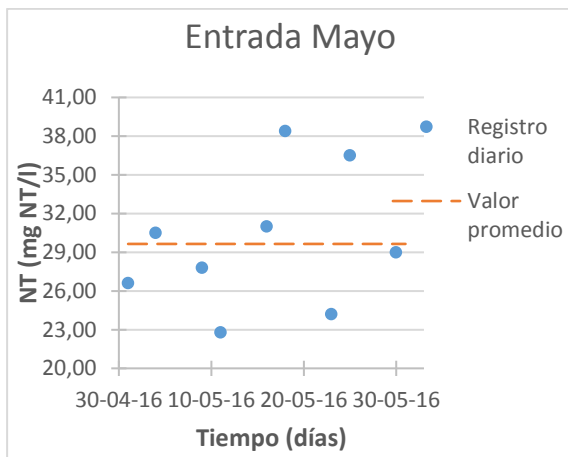
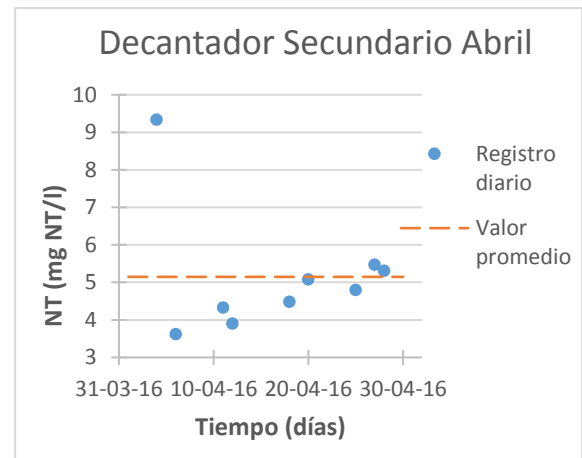
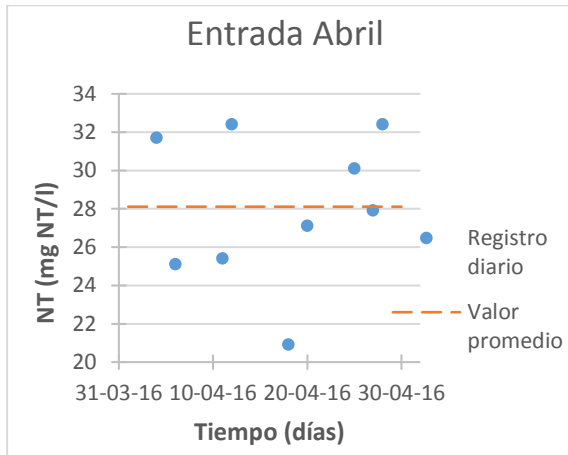


### 3.3.7. Resultados de AGV.

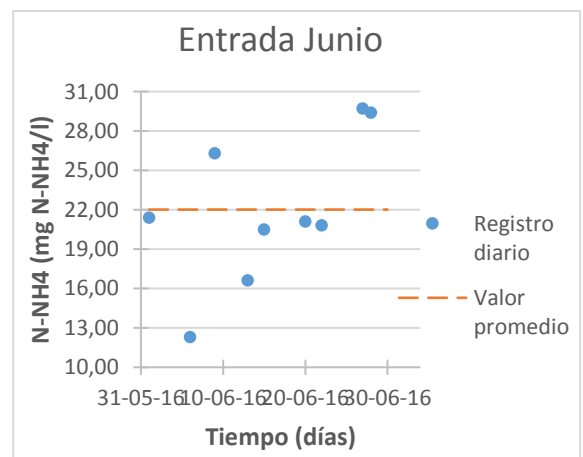
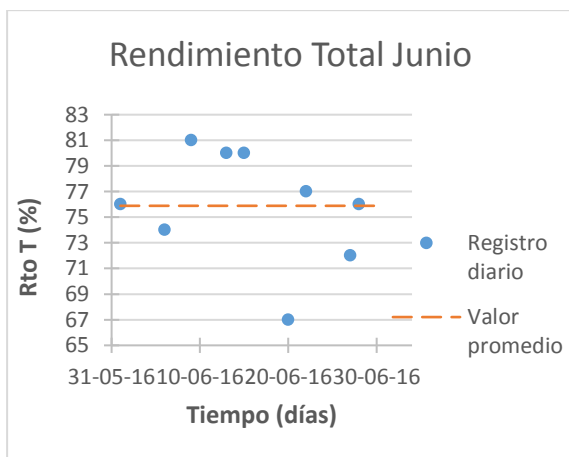
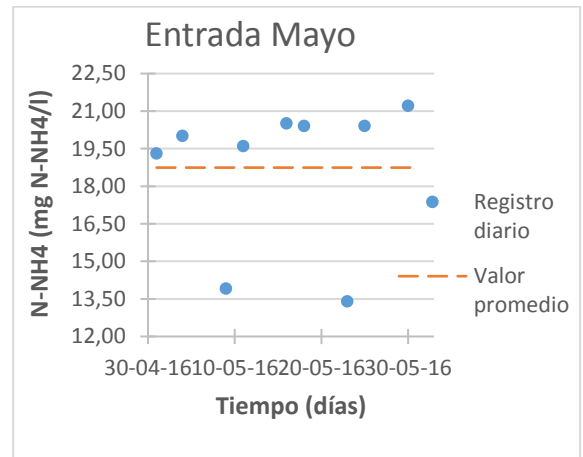
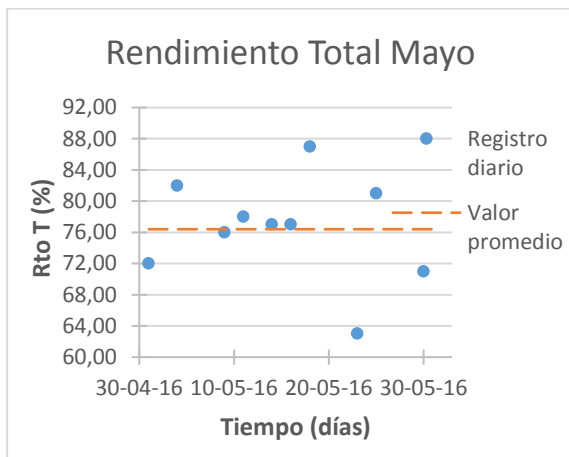
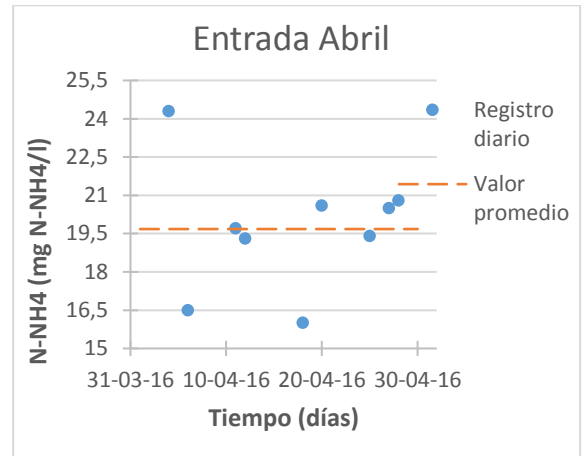
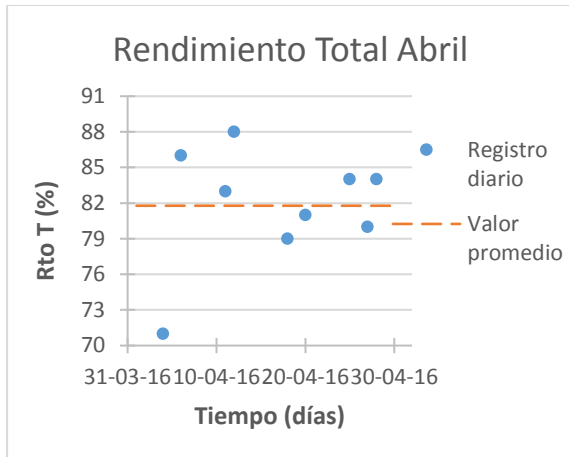


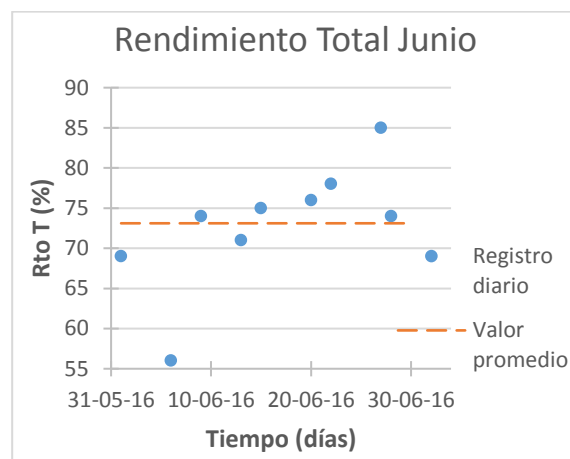
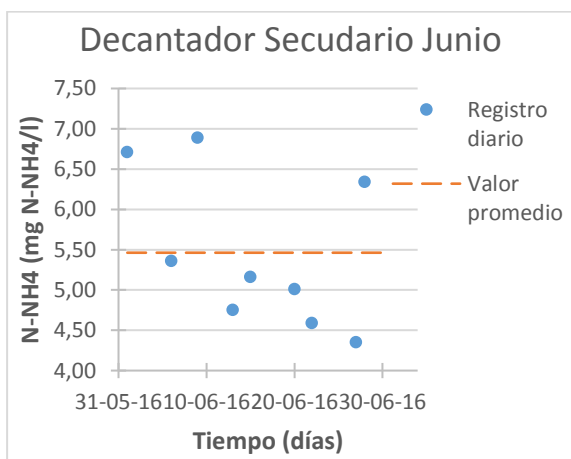
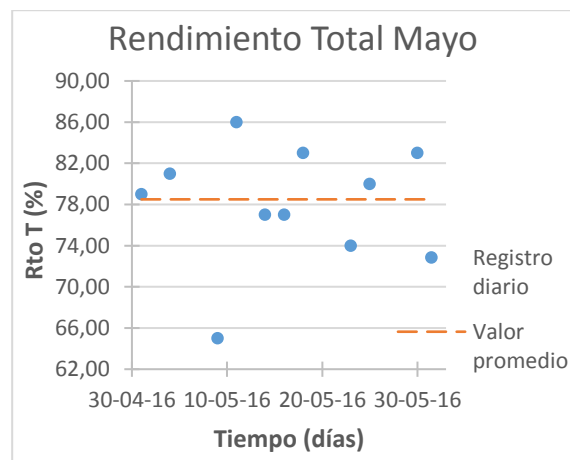
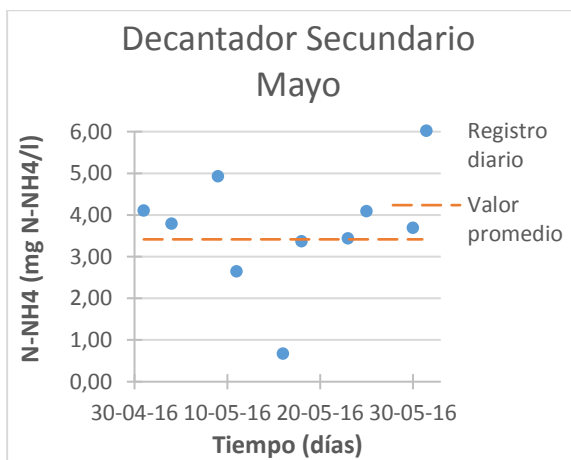
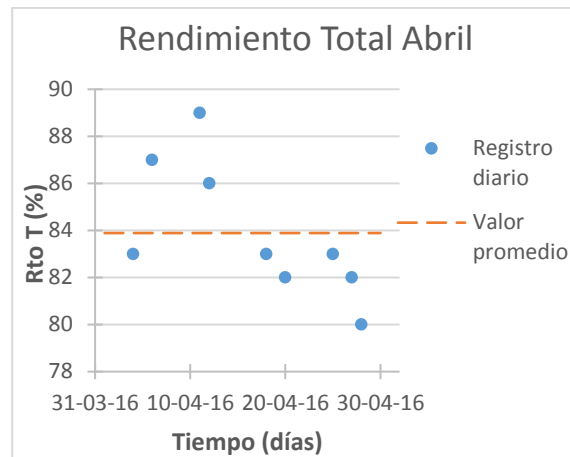
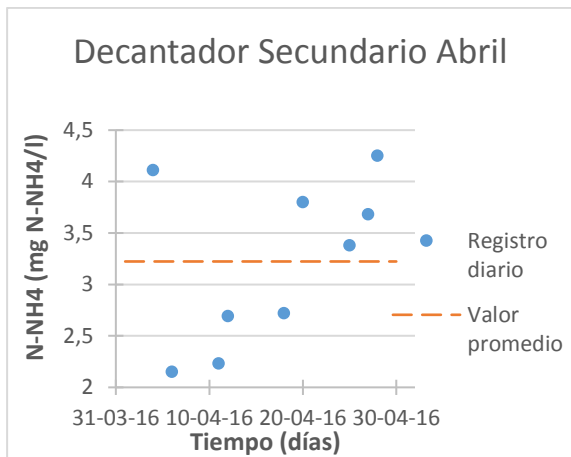
## 4. RESULTADOS ANALÍTICA DE NUTRIENTES.

### 4.1. Resultados de nitrógeno total.

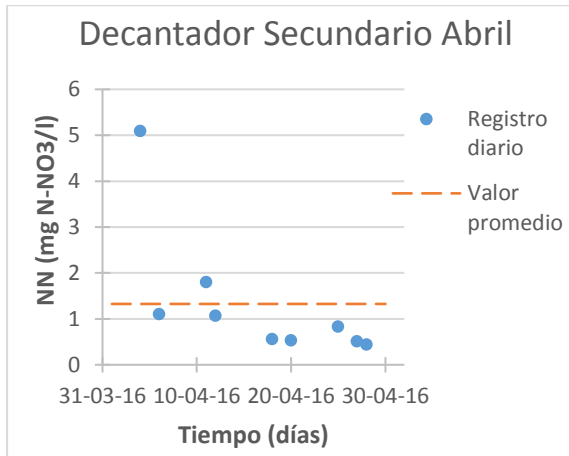


## 4.2. Resultados de N-NH4.

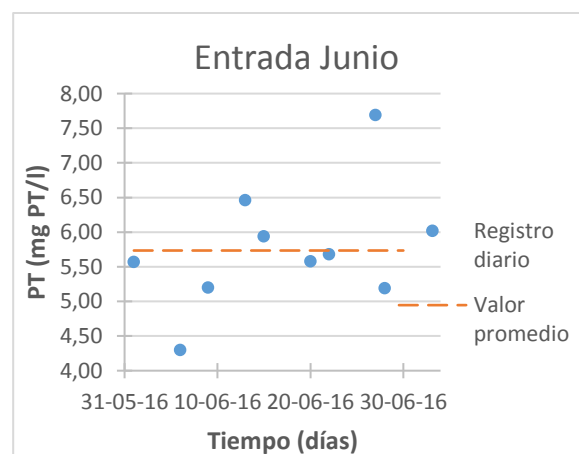
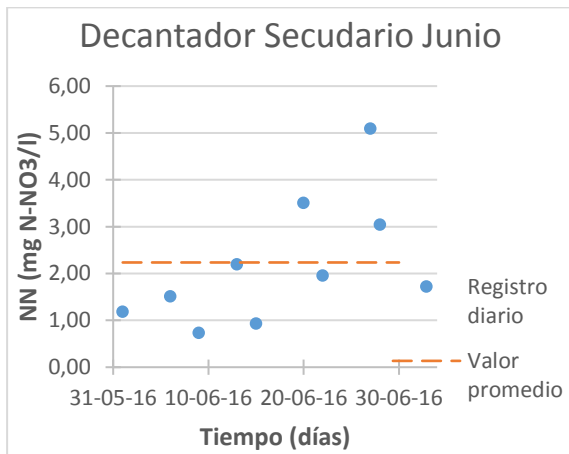
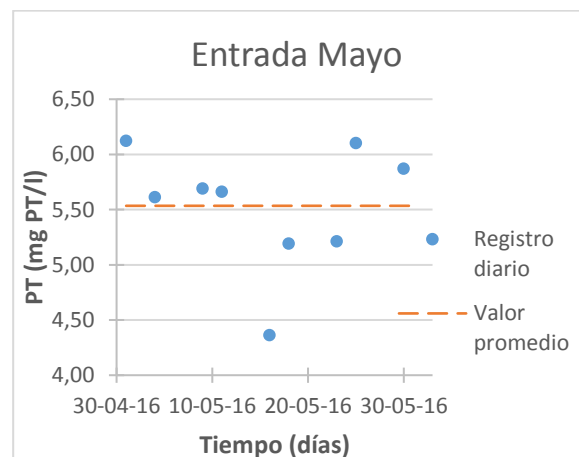
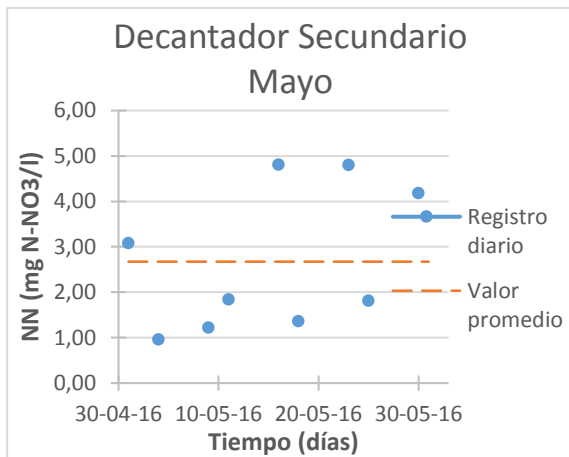
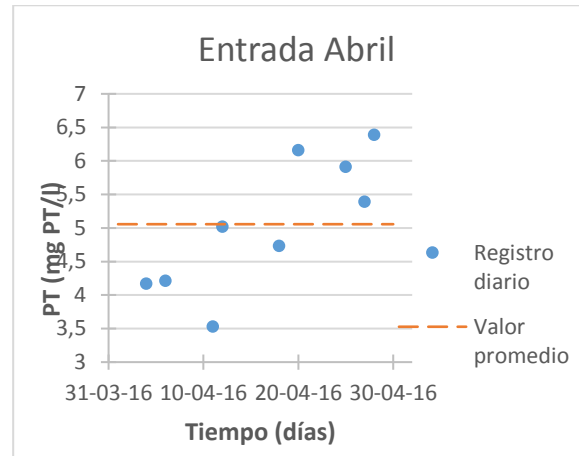


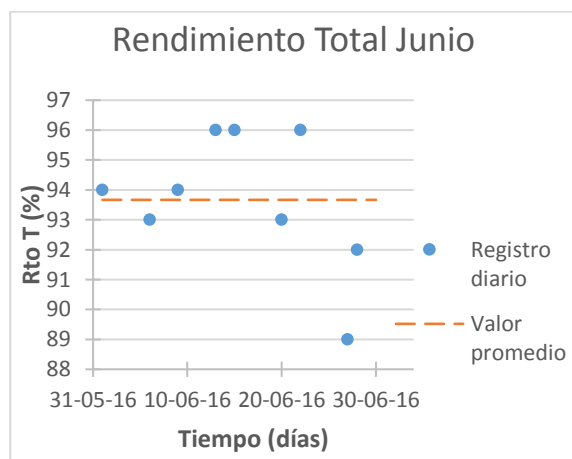
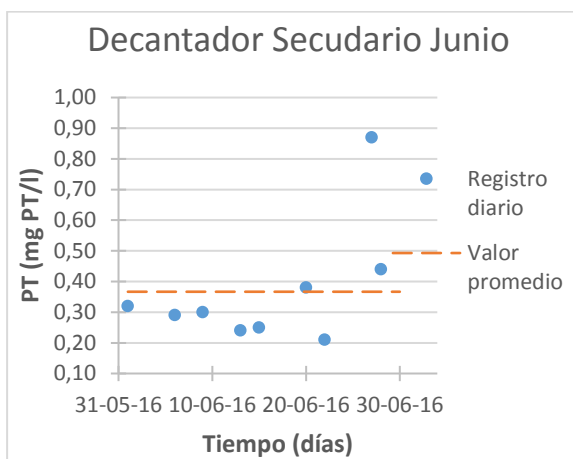
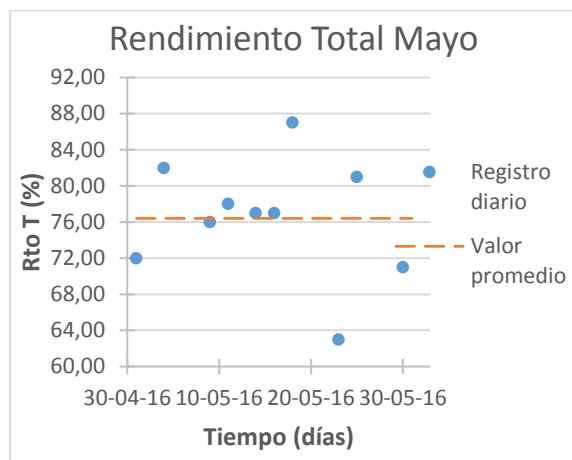
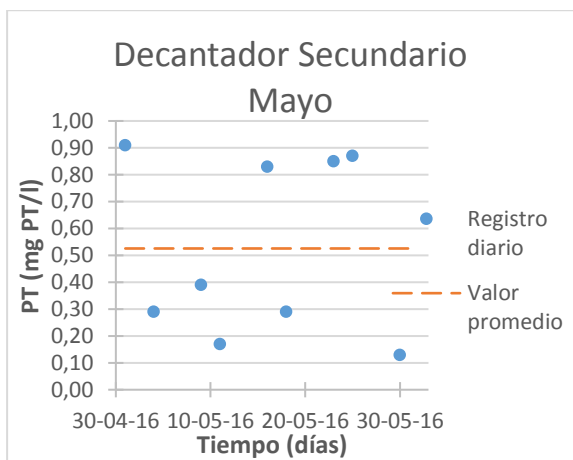
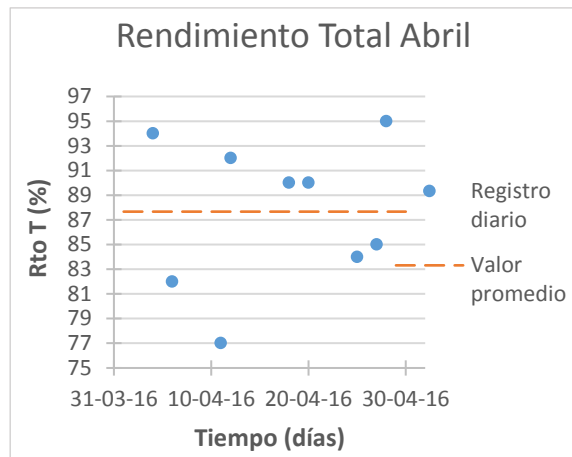
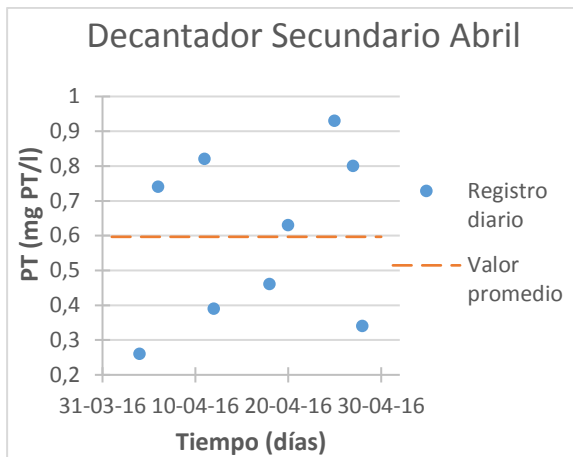


### 4.3. Resultados de N-NO3.



### 4.4. Resultados de fósforo total.



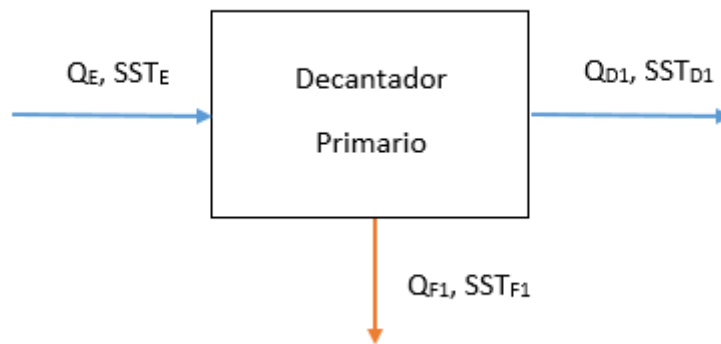




## ANEXO 2. CÁLCULOS COMPLEMENTARIOS

### 1. CÁLCULO DEL CAUDAL DE FANGO PRIMARIO.

A continuación, se realiza un balance de carga y caudales en la línea de agua para obtener el caudal que sale del decantador primario y entra en el espesado por gravedad, es decir, el caudal de fango primario ( $Q_{F1}$ ). Para obtener dicho valor se desprecian las recirculaciones en la línea de agua, suponiendo así que la totalidad de caudal de agua que entra en la planta es igual al que entra al decantador primario. Por lo tanto, los balances se aplican al decantador primario, tal y como se puede observar en la Figura 1.



**Figura 1. Balance en el decantador primario.**

Los valores de los distintos parámetros necesarios para realizar un balance de cargas y caudales en el decantador primario se encuentran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Parámetros de entrada y salida al decantador primario**

$Q_E$ (m <sup>3</sup> /d)	31.852
$SST_E$ (mg SS/l)	239
$SST_{D1}$ (mg SS/l)	154
$SST_{F1}$ (%)	0,53

Por lo tanto, los caudales  $Q_{D1}$  y  $Q_{F1}$  son incógnitas. El balance de caudales y de cargas se puede observar en la Ecuación 1 y 2, respectivamente.

$$Q_{D1} + Q_{F1} = Q_E \quad \text{Ec. 1}$$

$$Q_{D1} \cdot SST_{D1} + Q_{F1} \cdot SST_{F1} = Q_E \cdot SST_E \quad \text{Ec. 2}$$



Se despeja  $Q_{D1}$  de la Ec. 1 y se sustituya en la Ec. 2, de la cual se despeja el valor buscado de  $Q_{F1}$ . Para ello, previamente hay que pasar el valor de  $SST_{F1}$  de % a concentración, suponiendo para ello una densidad promedio del fango de 1 Kg/l, tal y como se explica a continuación.

$$SST_{F1} = \frac{0,53}{100} \cdot \frac{10}{10} = \frac{5,3}{1000} \frac{kg SST}{kg fango} \cdot \rho_{fango}$$

$$SST_{F1} = \frac{5,3}{1000} \frac{kg SST}{kg fango} \cdot 1 \frac{kg fango}{l} \cdot 10^3 \frac{dm^3}{m^3}$$

$$SST_{F1} = 5,3 \frac{kg SS}{m^3}$$

Por lo tanto, tras resolver el balance se obtiene que:

$$Q_{F1} = \frac{Q_E \cdot (SST_E - SST_{D1})}{SST_{F1} - SST_{D1}} = 526 \approx 530 \frac{m^3}{día}$$

Por último, sabiendo el caudal de fango primario se puede calcular el caudal de salida del decantador primario, según la Ecuación 1; por lo que,  $Q_{D1} = 31.326 \text{ m}^3/\text{día}$ , valor que será necesario para el siguiente apartado.

## 2. CÁLCULO DEL CAUDAL DE FANGO SECUNDARIO.

Los distintos cálculos para la determinación del caudal de fango secundario ( $Q_{F2}$ ), también denominado fango en exceso, se explican a continuación, los cuales parten de la siguiente figura, Figura 2.

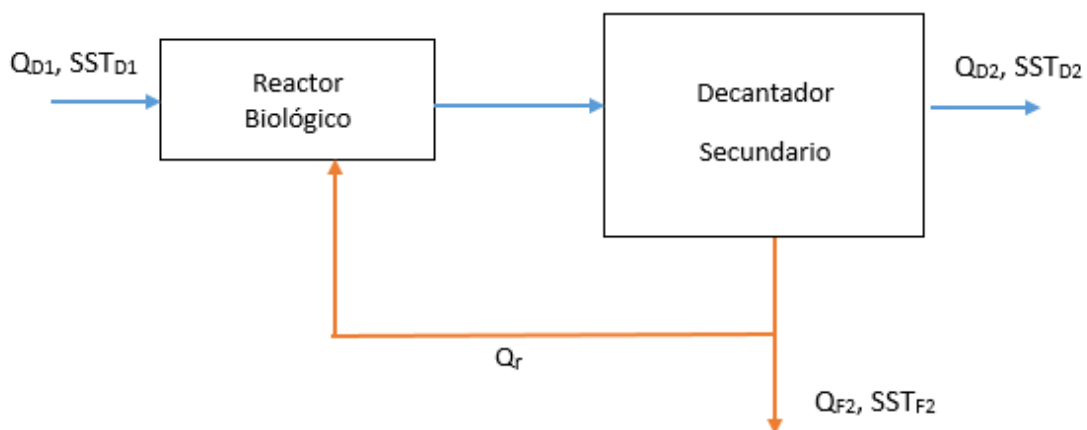


Figura 2. Diagrama de bloque del decantador secundario.

Debido a que solo se conoce el caudal de entrada al reactor biológico, y a la corriente de recirculación existente entre el decantador secundario y este, para el cálculo de caudales se utilizara la producción neta ( $\Delta X$ ), como se puede observar en la Ecuación 3.

$$\Delta X = Q_{D2} \cdot SST_{D2} + Q_{F2} \cdot SST_{F2} \quad \text{Ec. 3}$$

La salida del decantador secundario corresponde a su vez con la salida de la planta, por lo que el parámetro  $SST_{D2}$  tendrá un muy valor, pudiendo así despreciar el termino  $Q_{D2} \cdot SST_{D2}$ ; por lo que la producción neta quedaría simplificada en la Ecuación 4.

$$\Delta X = Q_{F2} \cdot SST_{F2} \quad \text{Ec. 4}$$

Ahora bien, según se puede encontrar reflejado en el libro Metcalf & Eddy: "Ingeniería de las Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización", para el cálculo de la producción neta se utiliza la fórmula de Huisken, como se puede observar en la Ecuación 5.

$$\Delta X = 1,2 \cdot Cm^{0,23} \cdot DL \quad \text{Ec. 5}$$

donde DL son los kg de DBO5 eliminada al día y se calcula según la Ecuación 6.

$$DL = 0,94 \cdot Q_{D1} DBO_{5-D1} \quad \text{Ec. 6}$$

Por otro lado, Cm es la carga másica y hace referencia a la recirculación, que como en este caso es convencional se encuentra en un intervalo de (0,2; 0,5). En este caso particular se utilizará un Cm promedio de 0,3.

Los valores utilizados para los diferentes cálculos se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2. Parámetros para el cálculo de caudal de fango secundario**

$Q_{D1}$ (m <sup>3</sup> /d)	31.326
$DBO_{5D1}$ (mg O <sub>2</sub> /l)	139
$SST_{F2}$ (%)	0,67
$SST_{F2}$ (kgSS/m <sup>3</sup> )	6,7

Realizando todos los cálculos se obtiene que  $DL = 4.093$  (kg DBO5/día) eliminada y  $\Delta X = 3.724$  kg SST/día. Por último, de la Ecuación 4 se despeja  $Q_{F2}$ .

$$Q_{F2} = \frac{\Delta X}{SST_{F2}} = \frac{3724 \text{ m}^3}{6,7 \text{ día}} \approx 556 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

