

**DISEÑO Y MEDICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ESTRUCTURA Y  
OPERACIÓN PARA LOS PROTOTIPOS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS DE  
FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL Y FILTRO PERCOLADOR PARA  
REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA**

**Asistentes de proyectos de investigación docente institucionalizado**

**Propuesta adscrita al proyecto docente “evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica de agua residual doméstica, proveniente de la ínsula de la central hidroeléctrica de Caldas -CHEC, utilizando humedales construidos de flujo subsuperficial”**

**HEBER BRANDON DÍAZ RAMÍREZ  
EDUAR ALEXIS MARTÍNEZ GIRALDO**

**ALEJANDRO RINCÓN SANTAMARÍA  
Tutor**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
2018**

**Nota de aceptación:**

**Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Católica de Manizales para optar al título de Ingeniería Ambiental.**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Manizales, 15 de junio de 2018**

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo, a mis padres Heber y Elisenia por el apoyo incondicional a lo largo de la carrera, a mi hermano Dilan por ser una compañía importante en mi formación como profesional.

Dedico este trabajo, a mis padres José Omar y Carmenza por haberme dado la posibilidad de ingresar a la universidad, por dar todo para que yo recibiera algo que nunca tuvieron ellos, a mi hermano Geovanny por haberme mostrado el camino ya que fue el primer interesado en que me formara como profesional.

### **Agradecimientos**

Reconocemos la colaboración del tutor del trabajo de investigación Alejandro Rincón Santamaría, por brindar sus conocimientos ya que sin su respectivo acompañamiento no hubiera sido posible presentar este trabajo. Además, por su excelente labor como docente sabiendo manejar los tiempos del estudiante, fomentando un espacio libre de presión y abierto a los cambios, generando hambre de conocimiento e interés por el tema. “Gracias”

## CONTENIDO

<b>TABLA DE TABLAS</b> .....	5
<b>TABLA DE ILUSTRACIONES</b> .....	6
<b>RESUMEN</b> .....	7
<b>ABSTRACT</b> .....	8
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	9
<b>1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	10
<b>2 JUSTIFICACIÓN</b> .....	12
2.1 Beneficios para la construcción de los prototipos del proyecto macro: .....	14
2.2 Beneficio para diseño y evaluación de sistemas a escala real:.....	14
2.3 Beneficio a ecosistemas: .....	15
2.4 Beneficio a poblaciones: .....	15
2.5 Potenciales usuarios directos de los resultados:.....	15
<b>3 OBJETIVOS</b> .....	16
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>4 MARCO TEORICO</b> .....	16
<b>5 METODOLOGÍA</b> .....	18
5.1 Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical: .....	18
5.2 lineamientos de diseño de estructura y operación de filtro percolador: .....	21
5.3 Características fisicoquímicas del efluente del pozo séptico de la PTAR (Agua residual a tratar en los prototipos) .....	43
Medición de caudal.....	43
Medición de pH y temperatura in situ.....	43
Cargas de los prototipos.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
5.6 Esquemas de los prototipos:.....	31
5.8 Determinación y verificación de parámetros de operación.....	38
5.9 Comparación CH y B <sub>DBO</sub> con respecto a recomendaciones de diseño definidas en el primer objetivo. ....	39
5.10 Grafica de la evolución de CH y B <sub>DBO</sub> .....	40
5.11 Diagrama cualitativo (Realizado por medio del software powerpoint) .....	44
5.12 Diagrama cuantitativo (Realizado por medio del software powerpoint) .....	45

5.13 Tabla de grados de libertad .....	46
<b>6 RESULTADOS</b> .....	<b>46</b>
6.1 Balances de materia. ....	46
- 6.2 Evaluación de la eficiencia de todo el sistema por medio del balance global.....	49
6.3 Diagramas individuales con los flujos de materia, para afluente y efluente de cada prototipo. ....	63
Línea de Fafas (Línea 1) .....	63
Línea de filtro percolador (línea 2) .....	65
6.4 Balance de energía para el sistema de bombeo. ....	67
<b>7 DISCUSION</b> .....	<b>69</b>
<b>8 CONCLUSIONES</b> .....	<b>70</b>
<b>9 Anexos</b> .....	<b>73</b>
Procedimientos y métodos para caracterización fisicoquímica de agua residual domestica .....	73
Actividades del muestreo:.....	73
<b>10 BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>79</b>

### TABLA DE TABLAS

Tabla 1. Profundidades de las capas de material filtrante .....	18
Tabla 2. Tamaños y granulometrías .....	19
Tabla 3. Frecuencia de pulsos. ....	19
Tabla 4. Calibres y dimensiones de tubería para afluente y efluente.....	20
Tabla 6. Límites para carga hidráulica en humedales verticales de flujo subsuperficial .....	21
Tabla 7. Limite para carga organica en Filtro percolador .....	23
Tabla 8. Filtro anaerobio de flujo ascendente .....	27
Tabla 9. Filtro percolador .....	28
Tabla 10 Humedales artificiales de flujo subsuperficial .....	29
Tabla 11. Tuberías, calibres y dimensiones de la tubería del sistema de tratamiento propuesto .....	29
Tabla 12. Fafa .....	31
Tabla 13. Tanque pulsos .....	32
Tabla 14. Tanque de distribución.....	33
Tabla 15. Prototipos de humedal sistema de distribución y recolección. ....	34
Tabla 16. Sistema de disposición.....	35
Tabla 17. Características de los prototipos. ....	37
Tabla 18. Calculo de las concentraciones promedio en la entrada de los prototipos línea 1. ....	38
Tabla 19. Calculo de las concentraciones promedio en la entrada de los prototipos línea 2. ....	38

Tabla 20. Concentraciones efluente del pozo séptico .....	44
Tabla 21. Ecuación número 1. ....	46
Tabla 22. Ecuación número 2. ....	46
Tabla 23. Ecuación número 3. ....	47
Tabla 24. Porcentajes de remoción de los prototipos.....	47
Tabla 25. Factores de conversión del balance de energía. ....	68
Tabla 26. Resultados de los balances de energía. ....	68
Tabla 27. Requerimientos especiales. ....	75

### **TABLA DE ILUSTRACIONES**

Ilustración 1. Tren de tratamiento .....	27
Ilustración 2 Evolución carga hidráulica línea 1.....	41
Ilustración 3 Evolución carga hidráulica línea 2.....	41
Ilustración 4 Evolución carga orgánica línea 1.....	41
Ilustración 5 Evolución carga orgánica línea 2.....	42
Ilustración 6. Cargas contaminantes diarias en el Efluente Tanque Séptico.....	44
Ilustración 7. Diagrama cualitativo.....	45
Ilustración 8. Diagrama cuantitativo.....	45
Ilustración 9. Tabla de grados de libertad. ....	46
Ilustración 10. Cargas de entrada del sistema de tratamiento propuesto .....	48
Ilustración 11. Cargas de salida del sistema de tratamiento propuesto.....	48
Ilustración 12. Concentraciones de entrada del sistema de tratamiento propuesto.....	48
Ilustración 13. Concentraciones de salida del sistema de tratamiento propuesto. ....	49
Ilustración 14. Remoción DBO5 vs sistemas de tratamiento 1.....	49
Ilustración 15. Remoción DBO5 vs sistemas de tratamiento 2.....	50
Ilustración 16. Remoción de DBO5 vs sistemas de tratamiento 3.....	51
Ilustración 17. Remoción de DBO5 vs sistemas de tratamiento 4.....	52
Ilustración 18. Remoción de DQO vs sistemas de tratamiento 1.....	53
Ilustración 19. Remoción de DQO vs sistemas de tratamiento 2.....	53
Ilustración 20. Remoción de DQO sistemas de tratamiento 3.....	54
Ilustración 21. Remoción de DQO vs sistemas de tratamiento 4.....	54
Ilustración 22. Remoción de SST vs sistemas de tratamiento 1.....	55
Ilustración 23. Remoción de SST vs sistema de tratamiento 2.....	55
Ilustración 24. Remoción de SST vs sistemas de tratamiento 3.....	56
Ilustración 25. Remoción de SST vs sistemas de tratamiento 4.....	56
Ilustración 26. Remoción de DBO5 vs sistemas de tratamiento línea 2 (1).....	57
Ilustración 27. Remoción de DBO5 vs sistemas de tratamiento línea 2 (2).....	57
Ilustración 28. Remoción de DBO5 vs sistemas de tratamiento línea 2 (3).....	58
Ilustración 29. Remoción de DBO5 vs sistemas de tratamiento línea 2 (4).....	58

Ilustración 30. Remoción de DQO vs sistemas de tratamiento línea 2 (1). .....	59
Ilustración 31. Remoción de DQO vs sistemas de tratamiento línea 2 (2). .....	59
Ilustración 32. Remoción de DQO vs sistemas de tratamiento línea 2 (3). .....	60
Ilustración 33. Remoción de DQO vs sistemas de tratamiento línea 2 (4). .....	60
Ilustración 34. Remoción de SST vs sistemas de tratamiento línea 2 (1). .....	61
Ilustración 35. Remoción de SST vs sistema de tratamiento línea 2 (2). .....	61
Ilustración 36. Remoción de SST vs sistema de tratamiento línea 2 (3). .....	62
Ilustración 37. Remoción de SST vs sistemas de tratamiento línea 2 (4). .....	62
Ilustración 38. Comparación de los resultados frente a la resolución 0631 de 2015. ....	67
Ilustración 39. Diagrama cuantitativo del sistema de bombeo. ....	68
Ilustración 40. Esquema básico para toma de muestras. ....	73
Ilustración 41. Cronometro. ....	73
Ilustración 42. Probeta. ....	73
Ilustración 43. Canal de rebose, afluente STARD (punto 1). ....	75
Ilustración 44. Cámara de salida punto de aforo efluente STARD (punto 3). ....	76
Ilustración 45. Ejemplo de etiqueta autoadhesiva para muestreos en botellas. ....	77

## **RESUMEN**

En este trabajo, se pretende diseñar siete prototipos entre los cuales uno es un filtro percolador y los demás son humedales de flujo subsuperficial vertical de 55cm y 65cm de espesor de arena, con lo cual se pretende evaluar el porcentaje de remoción en cuanto a materia orgánica se entiende, generada por las aguas residuales domesticas (ARD), de la zona rural de Palestina, Caldas. El trabajo consiste principalmente de: i) se realiza una investigación de la literatura para entender el procedimiento para la construcción de los prototipos que se desean implementar (humedales y filtro percolador), ii) se realizara un trazado de las medidas para cada uno de los prototipos de tratamiento, iii) establecer las medidas más prominentes en cuanto al diseño y el espacio que se tenía para su correcto funcionamiento, iv) construir los prototipos, v) evaluar las características de operación para las unidades construidas carga hidráulica aplicada y carga orgánica superficial aplicada.

El factor de estudio es la composición del lecho filtrante, la profundidad de las capas de arena y grava, las características granulométricas de los materiales, la elección de las medidas más eficientes de acuerdo al espacio.

Se generarán datos de diseño, desempeño, factibilidad, funcionamiento de los humedales y del filtro percolador a su escala piloto para los estudiantes, investigadores y docentes.

### **ABSTRACT**

In this work, one tries to design seven prototypes between which one is a filter percolator and the demas are wetlands of subsuperficial vertical flow of 50cm and 70cm of thickness of sand, with which one tries to evaluate the percentage of removal as for organic matter he understands himself, generated by the waste water domestic (ARD), in the rural zone of Palestina. The work consists principally of: i) an investigation of the literature is realized to understand the procedure for the construction of the prototypes that are wanted to implement (wetlands and filter percolator), ii) a trazeo of the measures was realized for each of the prototypes of treatment, iii) establish the most outstanding measures regarding the design and the space that was taken into account for the correct operation, iv) to construct the prototypes, v) the characteristics of operation to evaluate for the constructed units hydraulic applied load and organic superficial applied load.

The factor of study is the composition of the filtering bed, the depth of the layers of sand and gravel, the granulometric characteristics of the materials, the choice of the measures mas efficient in agreement to the space. There were generated information of design, performance, feasibility, functioning of the wetlands and of the filter percolator to his pilot scale for the students, investigators and teachers.



## INTRODUCCIÓN

La producción de aguas residuales es inherente a las actividades humanas. Los sistemas agropecuarios, la industria, el comercio y, en particular, las naturalezas biológicas del ser humano generan inevitablemente residuos líquidos y sólidos que generan contaminación en los ecosistemas. Las denominadas aguas residuales históricamente se han considerado un problema para la sociedad debido a que generan olores agresivos, apariencia desagradable y acarrear problemas de salud pública (Tchobanoglous et al., 2003).

Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2011) aproximadamente sólo el 9% de las aguas residuales son tratadas en el país y las prácticas más comunes son el vertimiento de aguas residuales sin tratamiento previo hacia fuentes de agua superficiales o al suelo, lo cual incrementa los niveles de contaminación hídrica, afecta el equilibrio del ecosistema, reduce la oferta hídrica y limita los potenciales usos del agua (IDEAM, 1998)

Todos los impactos negativos que se generan por el mal uso de las aguas residuales perjudica enormemente la calidad de vida de la población y los ecosistemas aledaños por lo cual es de suma importancia la implementación de nuevas tecnologías que desarrollen tratamientos eficientes con bajos costos de construcción operación y mantenimiento. El desarrollo de los llamados “sistemas naturales” para tratamiento de aguas residuales, en el marco de la ecotecnología, constituyen un enfoque alternativo ya que promueven la reducción o el uso nulo de fuentes de energía externas y aditivos químicos (Brix y Arias, 2003; García y Corzo, 2008; Mena, 2008), lo cual supone una baja en los costos de operación del sistema de tratamiento frente a los sistemas convencionales. Específicamente, los humedales construidos son una de las ecotecnologías más estudiadas por representar una buena opción en términos de costos, valor estético y efectividad en la remoción de

contaminantes presentes en las aguas residuales de distintas procedencias (Brix y Arias, Carlos, 2003; Mena, 2008).

Por lo cual en este trabajo se pretende con el diseño de estos prototipos verificar cómo se comportan los valores de determinadas cargas contaminantes provenientes del agua residual de la ínsula, evaluando variables de diseño de estructura y operación de los prototipos como profundidades de las capas de grava y arena, tamaños o granulometrías de las capas de material filtrante entre otras, con el propósito de definir que humedal o filtro percolador tiene las mejores condiciones (mayor porcentaje de remoción) para el tratamiento de las aguas residuales y también utilizar estos datos experimentales en la implementación de un sistema eficiente a escala real.

## **1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En La Insula, de la Central Hidroeléctrica de Caldas, en el sistema de tratamiento de agua residual doméstica (PTARD), el filtro percolador no está funcionando; debido a que presenta una obstrucción. El sistema de tratamiento del agua residual doméstica comprende trampa de grasas, pozo séptico y filtro percolador. El filtro percolador presenta obstrucción seria, de modo que no realiza depuración. Por observación directa, se puede notar que en gran parte esto se debe a que el sistema de distribución es inadecuado, por la errónea ubicación de los orificios de salida que genera una gran falta de homogeneidad. Sin embargo, es posible que también haya otras fallas en el sistema, por ejemplo: subdimensionamiento o sobrecarga del sistema; inadecuado tamaño de la grava, inadecuado sistema de recolección. Aunque estos aspectos no han sido verificados.

Actualmente, toda la PTARD realiza una depuración mayor a 80%, en cuanto a DBO y sólidos; a pesar de la falla del filtro percolador. Sin embargo, prontamente se exigirá el cumplimiento de la nueva normativa, la Resolución 631 de 2015, que requiere una DQO de 200 mg/L, y sólidos Suspendidos Totales 100 mg/L. Por tanto, es importante evaluar posibilidades, incluyendo la posibilidad de arreglar el filtro percolador; y la posibilidad de usar humedales artificiales, preferiblemente de flujo vertical.

Además, como la depuración del sistema no es total, causa contaminación en el río receptor, con impacto al medio ambiente: altera las propiedades fisicoquímicas del río, genera eutrofización, reduce el oxígeno disuelto necesario para las especies acuáticas, afecta la fotosíntesis de las algas.

De este modo, es necesario y útil un estudio de tratamiento del agua efluente del pozo séptico, usando prototipos de humedales artificiales a escala piloto, con medición de: i) parámetros de calidad del agua; ii) la eficiencia de remoción de la carga contaminante; iii) parámetros de operación como carga hidráulica, carga orgánica superficial.

En zona rural, se requieren que los sistemas de tratamiento la operación y mantenimiento sea simple y no requiere grandes costos, que el consumo de energía eléctrica y de insumos químicos sea muy bajo o nulo, que sea amigable con el medio ambiente, compatible con la biodiversidad del sector.

Aunque en Colombia, la aplicación y estudios de los humedales artificiales son recientes; se tiene conocimiento de que en el departamento de Risaralda se han realizado varios estudios, con resultados positivos.

Sin embargo, el estudio con prototipos es nada más que una prueba que se realiza con poca inversión, para demostrar a través de un estudio experimental, como se comportan los valores de las cargas contaminantes ante la incursión de un humedal artificial.

## **2 JUSTIFICACIÓN**

El estudio de desempeño de una planta de tratamiento de aguas residuales, aporta datos de diseño de tecnologías como los humedales, datos de remoción de la materia orgánica y otros parámetros analizados los cuales traen beneficios a las problemáticas ambientales pertinentes al recurso agua, ya que afectan considerablemente la parte biótica y abiótica de los ríos y sus alrededores considerándolos como los principales vertederos y canales dentro de cualquier ecosistema, generando impactos como: alteración de los parámetros fisicoquímicos del agua, eutrofización, pérdida de especies animales y vegetales acuáticas, generación de vectores y patógenos, afectación a la salud de la población, disminución de la calidad de vida.

Se pretende mitigar estos impactos anteriormente mencionados con la implementación de este proyecto, de acuerdo a la normativa específicamente a la resolución 631 de 2015 se tienen previstos unos límites permisibles para el vertimiento de aguas residuales (ARD), en cuanto a norma se refiere deben ser cumplidos por la central hidroeléctrica de la CHEC por tal motivo y teniendo la experiencia adquirida, sabemos que la eficiencia en la construcción de los humedales favorece para que se cumpla esta resolución vigente, por esto el uso de humedales se hace perfecto para la ocasión.

El uso de humedales artificiales presenta el siguiente tipo de ventajas:

- I. Bajo o nulo uso de insumos químicos.

- II. Bajo o nulo uso de energía no-natural.
- III. La operación y mantenimiento es fácil y de bajos costos.
- IV. Ahorros económicos significativos en comparación con otras tecnologías de tratamiento, debido a los anteriores aspectos.
- V. La generación de lodos es relativamente baja, debido a que no hay consumo de insumos químicos.
- VI. La disposición de lodos tiene un costo relativamente bajo, debido a que la cantidad de lodos generados es baja.
- VII. La materia orgánica obtenida en el proceso microbial, puede ser utilizada como un insumo orgánico en actividades agrícolas.
- VIII. La contaminación del agua (carga orgánica) tipo ARD, cuando es descargado al afluente más próximo a la planta disminuye significativamente.
- IX. La implementación de tecnologías avanzadas favorece el prestigio de la empresa.
- X. Con la implementación de la nueva norma ambiental, se modifican o se reemplazan estos sistemas por otros más eficientes y de tal manera que cumplen con ella.

El cuidado del agua es parte fundamental del cuidado de los recursos naturales, por tanto es de gran importancia el desarrollo de tecnologías innovadoras, que vayan de la mano con el medio ambiente para que así surjan menos impactos contra el ecosistema, mejore el fortalecimiento del área ambiental, se concientice a la comunidad de los aspectos que generan caos dentro del ciclo hidrológico, se motiven nuevas generaciones de investigadores para el ámbito de los recursos y del medio ambiente, que la relación entre sociedad, economía y ambiente lleve a un desarrollo sostenible del municipio y en prospera del departamento. Este proyecto genera datos e información que son un insumo importante para el diseño, dimensionamiento, operación y construcción de

humedales artificiales de flujo vertical a escala real, para tratamiento de las ARD, y contribuye directamente a:

- El mejoramiento de la calidad del agua de ríos y riachuelos actualmente afectados.
- La preservación de los ecosistemas que están en la cercanía de los ríos y riachuelos, lo que se logra con una mejora de la calidad del agua.

### **2.1 Beneficios para la construcción de los prototipos del proyecto macro:**

El avance del estudio contribuyen al proyecto macro. La definición de características de estructura y operación, permiten la correcta construcción de los prototipos, de forma que:

- Se logre una suficiente remoción de materia orgánica y sólidos.
- Se tenga una correcta operación sin fallas o inconvenientes.
- Las características de estructura y operación de los prototipos corresponda con los lineamientos de construcción de sistemas a escala real.

### **2.2 Beneficio para diseño y evaluación de sistemas a escala real:**

Los avances del estudio, contribuyen al diseño de sistemas a escala real:

- Permiten tener unos prototipos que cumplan los lineamientos para humedal y filtro percolador a nivel real; por tanto contribuyen a que los datos obtenidos del desempeño de los prototipos sean aplicables a diseño de sistema a escala real.

Los avances del estudio, contribuyen al cumplimiento de la nueva normativa para vertimientos:

- Los datos obtenidos son un insumo para la implementación de sistemas a escala real, que cumplan la nueva normativa para vertimientos.

Los avances del estudio, contribuyen al renocimiento de las fallas del filtro percolador:

- Los lineamientos de estructura y operación que se consultan para el filtro percolador, son un insumo para la comprensión de la falla del filtro percolador actualmente existente. Así, la CHEC tendrá criterios, ya sea para definir cómo se debe realizar su mejoramiento o para construir uno nuevo.

### **2.3 Beneficio a ecosistemas:**

- Disminuye la carga orgánica que proviene de ARD y que se vierte a la corriente fluvial.
- El mejoramiento de la calidad del agua de ríos y riachuelos actualmente afectados.
- La preservación de los ecosistemas que están en la cercanía de los ríos y riachuelos, lo que se logra con una mejora de la calidad del agua.

### **2.4 Beneficio a poblaciones:**

El mejoramiento de la calidad de vida de las poblaciones por donde atraviesa el recurso hídrico afectado, pues una mejor calidad del agua implica su potencial utilización en actividades como riego de cultivos descarga de sanitarios, actividades industriales o agroindustriales, entre otros, generando ahorro económico pues se disminuye la utilización de agua potable para dichos usos.

### **2.5 Potenciales usuarios directos de los resultados:**

- La Central Hidroeléctrica de Caldas CHEC: el estudio aporta lineamientos de estructura y operación para humedales y filtro percolador; para escala real.

## **2.6 Potenciales usuarios indirectos de los resultados:**

- Estudiantes, investigadores de la UCM: la información generada, es un insumo para posteriores proyectos de investigación en depuración de agua residual doméstica usando humedales y filtro percolador.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y medir las características de estructura y operación para los prototipos de humedales construidos de flujo subsuperficial vertical y filtro percolador para remoción de materia orgánica.

### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Definir los lineamientos de diseño de estructura y operación de los prototipos de humedal y de filtro percolador.
- Establecer las características de operación de los prototipos: carga orgánica y carga hidráulica.
- Evaluar los flujos de materia para afluente y efluente de los prototipos.

## **4 MARCO TEORICO**

En el proyecto de trabajo de grado se pretende implementar unos prototipos de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical u/o horizontal en la zona rural de palestina caldas con la finalidad de tratar una determinada cantidad de ARD y comprobar el porcentaje de remoción y eficiencia de cada prototipo, por lo tanto, es importante entender cómo funcionan los humedales artificiales y determinar cuál es más eficiente y rentable.



Un Humedal Artificial de Flujo Vertical es un lecho de filtración que se planta con vegetación acuática. Las aguas residuales se vierten o dosifican a la superficie del humedal desde arriba usando un sistema mecánico de dosificación. El agua fluye verticalmente hacia abajo por la matriz del filtro. Al dosificar intermitentemente el humedal (de cuatro a diez veces al día), el filtro pasa por periodos de saturación y falta de saturación y, por lo tanto, diferentes condiciones aeróbicas y anaeróbicas. La frecuencia de dosificación se debe ajustar para que la dosis anterior de aguas residuales tenga tiempo de filtrarse por el material, para que el oxígeno tenga tiempo de difundirse por el medio y llenar los espacios vacíos. Habitualmente los Humedales Artificiales de flujo Vertical se diseñan para tratar aguas residuales que han pasado por un pre tratamiento. Estructuralmente, hay una capa de grava para drenar (un mínimo de 20 cm), seguida de capas de arena y grava (para efluente ya asentado) o arena y grava fina (para efluente primario).

La diferencia importante entre el humedal vertical y el horizontal no sólo es la dirección del flujo, sino las condiciones aeróbicas, ya que los humedales artificiales horizontales favorecen más las condiciones anaerobias al mantenerse el nivel del agua por debajo del sustrato. Este Humedal Artificial Horizontal simplemente es un canal grande relleno con grava y arena donde se planta vegetación acuática, principalmente lo que sucede en este humedal es que el agua residual circula horizontalmente a través del sustrato de manera continua, al fluir estas aguas residuales por el canal, el material filtra partículas y microorganismos y degrada la materia orgánica, también tiene la capacidad de desarrollar procesos de desnitrificación entre otros.

La elección de instalar un tipo de humedal frente a otro radica en la composición de las aguas residuales. En muchas ocasiones se utiliza una combinación de diferentes tipos de humedal. Por ejemplo, si queremos eliminar nitrógeno lo más conveniente sería hacer pasar el ARD primero por

un humedal de flujo subsuperficial vertical (nitrificación) y después por un humedal de flujo subsuperficial horizontal (desnitrificación).

## 5 METODOLOGÍA

**Definir los lineamientos de diseño de estructura y operación de los prototipos de humedal y de filtro percolador.**

### 5.1 Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical:

En este tipo de humedales artificiales las aguas a tratar circulan horizontalmente, atravesando un material filtrante de grava, sobre el que está fijada la vegetación, y que se dispone en un espacio impermeabilizado. (2015)

- Profundidades de las capas de grava y arena de la zona de material filtrante, con base en revisión de literatura:

Tabla 1. *Profundidades de las capas de material filtrante*

Fuente: Tomada de reporte de Alejandro Rincón

Ubicación de la capa y tipo de material	Profundidad de la capa	Referencia
Fondo; grava	20 cm	Von Munch
	20cm	UN, 2008
Zona media (capa principal); arena	mayor o igual a 50cm	Von Munch
	45 cm	UN, 2008
Zona superior; grava	15 cm	Von Munch

- Tamaños o granulometrías de las capas de material filtrante:

Tabla 2. *Tamaños y granulometrías*

Fuente: Tomado de reporte de Alejandro Rincón

<b>Tamaños y granulometrías del lecho filtrante</b>	<b>Referencias</b>
20 cm grava en el fondo, al menos 50cm de arena, 15 cm de grava en la parte superior y 15 cm de borde libre	Vonmunch

- Características del sistema de distribución de agua residual:

Las aguas residuales pueden ser descargadas a los filtros mediante sifones, bombas o por gravedad desde las unidades de tratamiento primario cuando se hayan desarrollado características adecuadas de flujo. Las aguas residuales pueden ser distribuidas sobre la superficie del filtro por distribuidores rotatorios que giran alrededor de un eje, u otros aditamentos que permitan una distribución uniforme sobre el área superficial del filtro teniendo en cuenta que el proceso biológico que tiene lugar en los filtros percoladores requiere del contacto de la biomasa con el oxígeno del aire, la adecuada ventilación de este dispositivo de tratamiento es un elemento esencial y se debe prestar atención a todo aquello que pueda impedir una oxigenación adecuada. (Zumalacárregui, 2005)

- Frecuencia de los pulsos de afluente a los humedales:

La frecuencia o pulso de aplicación del agua residual se calcula considerando que no se acumule agua en la superficie procedente del riego anterior. Al controlar los pulsos de aplicación favorece la oxigenación del interior del lecho filtrante. (Oscar Delgadillo, 2010)

Tabla 3. *Frecuencia de pulsos.*

Fuente: Tomada de reporte Alejandro Rincón

<b>Frecuencia de pulsos</b>	<b>Referencia</b>

4-12.	(Hoffmann, 2011, p. 25)
8-12, cuando no se usa hay recirculación	Brix y Arias, 2005, p. 495

- Bomba para los pulsos: Potencia

Con el fin de garantizar una correcta oxigenación del suelo y del lecho del humedal, se recomienda realizar entre 4 y 6 pulsos diarios de aportación de caudal al humedal, dejando un tiempo de transición entre cada pulso para evitar saturación del humedal. En estos casos se utilizan bombas eléctricas para el control de cada pulso y no se recomienda en lugares donde no se cuente con un suministro eléctrico o no se disponga de algún tipo de energía alternativa que alimente las bombas. De ser así, se puede utilizar un sifón auto descargante, el cual se puede conseguir en estados unidos o en Europa; en Colombia es de difícil obtención. (Münch, 2009)

La capacidad de cada bomba no debe ser menor que la mitad del caudal para el cual se proyectó la planta. (Zumalacárregui, 2005)

- Tubería:

Areas, calibres y dimensiones de la tubería para la entrada y salida del flujo, y tamaños de los orificios.

Tabla 4. *Calibres y dimensiones de tubería para afluente y efluente.*

Fuente: Tomada de reporte de Alejandro Rincón

<b>Calibres y dimensiones de tubería</b>	<b>Referencias</b>
Distancia entre tubería no mayor a 5 m	BRIX

Diámetro de tubería 32-45mm	GarciaCorzo
Agujeros de 5-7mm a cada 40-70cm	
Diámetro tubería de recolección 90-120mm	
Tubería de aireación por cada 4m <sup>2</sup>	

- Carga hidráulica aplicada (CH), y carga orgánica superficial aplicada (en términos de DBO o DQO), de tal forma que se logre que la concentración del efluente cumpla los límites de la nueva normativa de vertimientos, que fue promulgada en el 2015.

Tabla 5. Límites para carga orgánica en Humedales verticales de flujo subsuperficial

Fuente: tomada de reporte de Alejandro Rincón

Parámetro	Valor	Referencia
Carga orgánica	13.5gDBO5/m <sup>2</sup> *d	Kivais (2001, p. 554)
Carga orgánica	15gDBO5/m <sup>2</sup> *d	Vymazal et al. (1998, p. 23)

Tabla 5. Límites para carga hidráulica en humedales verticales de flujo subsuperficial

Fuente: Tomada de reporte de Alejandro Rincón

Parámetro	Valor	Referencia
Carga hidráulica	8-30cm/d	Arroyave (2010, p. 93)
Carga hidráulica	10-20cm/d	Morel y Diener (2006, p. 36)

## 5.2 lineamientos de diseño de estructura y operación de filtro percolador:

Es un relleno cubierto de limo biológico a través del cual se percola el agua residual, El agua residual percola en forma descendente a través del relleno y el efluente se recoge en el fondo (Ramalho, 1980)

- Profundidades de las capas de grava y arena de la zona de material filtrante:

Los filtros percoladores pueden procesar entre 1,0186 metros cúbicos y 4,0745 metros cúbicos de aguas negras por metro cuadrado de la superficie del filtro por día. Por lo general, se diseñan para tratar 2,0372 metros cúbicos por metro cuadrado por día. A la cantidad de material biológico que un sistema de tratamiento puede procesar por día se llama tasa de carga orgánica. La carga orgánica para los filtros percoladores, se mide en libras de DBO5 por día por pie cúbico. La tasa de carga orgánica para un filtro percolador es por lo general entre 0.005 y 0.025 libras de DBO5 por día por pie cúbico de medio. La profundidad de la cama de medio de los filtros percoladores puede variar. Entre más profundo es el medio del filtro percolador, más DBO5 puede manejar por día. Los filtros percoladores a nivel comunitario fluctúan entre 0,9144 y 2,4384 metros de profundidad. Un filtro percolador para una casa puede tener entre 0,6096 y 0,9144 metros de profundidad. La profundidad que se escoja depende de la cantidad y la fuerza de las aguas negras que se espera que maneje el sistema por día. El medio en el filtro percolador debe ser de un material poroso, ya sea de piedras o plástico. Debe tener un área grande de superficie con grandes aberturas para permitir que el material biológico tenga buena aireación.

- Características del sistema de recolección:

Limpieza con agua la parte inferior del filtro recibe el agua residual tratada y la conduce hacia el canal de evacuación principal. Deben hacerse provisiones para la limpieza de los desagües con agua. En filtros pequeños es aceptable el uso de un canal de carga periférica con ventilación vertical. Los sistemas de desagües inferiores podrían llegar a obstruirse por acumulación de grasa y crecimiento biológico. Esto, además de ser causa de obstrucción

de la salida del efluente, conspira contra una buena ventilación del filtro. (Zumalacárregui, 2005)

Tabla 6. *Límite para carga orgánica en Filtro percolador*

Fuente: tomada de reporte de Alejandro Rincón

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Referencia</b>
Carga orgánica	0.1-0.4 kgDBO5/m3.dia	Rincón, 2018
Carga orgánica	0.4-0.8 kgDBO5/m3.dia	Rincón, 2018

Tabla 8. *Límites para carga hidráulica en filtro percolador*

Fuente: Tomada de reporte de Alejandro Rincón

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Referencia</b>
Carga hidráulica	0.04 – 0.2 m/h	Rincón, 2018
Carga hidráulica	0.4-1.2 m/h	Rincón, 2018

Tabla 9. *Parámetros de diseño de un filtro percolador*

Fuente: Secretaria de medio ambiente y recursos naturales. México (1996). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. 22-216

Característica	Baja	Intermedia	Alta	Súper alta
Medio de soporte	Roca, escoria	Roca, escoria	Roca, plástico	Plástico
Carga hidráulica (m3/m2*día)	1-4	4-10	4-10	40-200
Carga orgánica (KgDBO5/m3*día)	0.08-0.32	0.24-0.48	0.32-10	0.8-0.6
Profundidad m	1.8-2.4	1.8-2.4	0.90-1.80	3-12
Relación de recirculación	0	0-1	1-2	0-2
Desprendimiento de biomasa	Intermitente	intermitente	Continuo	Continuo

Remoción de DBO	80-90	50-70	65-85	65-85
Efluente	Bien nitrificado	Parcialmente nitrificado	Poca nitrificación	Poca nitrificación

- Tamaños o granulometrías de las capas de material filtrante:

Tabla 10. *Características del medio de soporte para filtros percoladores*

Fuente: Metcalf; Eddy. (1995). Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización, 706 - 1505

<b>Medio</b>	<b>Tamaño nominal mm</b>	<b>Masa por unidad de volumen, kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Superficie específica m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup></b>	<b>Porcentaje de huecos %</b>
Grava de río				
Pequeñas	25-62.5	1.250-1.440	55-69	40-50
Grandes	100-125	800-990	39-164	50-60
Escoria de altos hornos				
Pequeñas	50-70	900-1200	55-69	40-50
Grandes	75-125	800-990	46-59	50-60
Plástico				
Convencional	600*600*1200b	32-96	79-98	94-97
Alta superficie específica	600*600*1200b	32-96	98-196	94-97

b) tamaño del modulo

- Características del sistema de distribución de agua residual:

Las aguas residuales pueden ser descargadas a los filtros mediante sifones, bombas o por gravedad desde las unidades de tratamiento primario cuando se hayan desarrollado características adecuadas de flujo. Las aguas residuales pueden ser distribuidas sobre la superficie del filtro por distribuidores rotatorios que giran alrededor de un eje, u otros aditamentos que permitan una distribución uniforme sobre el área superficial del filtro teniendo en cuenta que el proceso biológico que tiene lugar en los filtros percoladores



requiere del contacto de la biomasa con el oxígeno del aire, la adecuada ventilación de este dispositivo de tratamiento es un elemento esencial y se debe prestar atención a todo aquello que pueda impedir una oxigenación adecuada. (Zumalacárregui, 2005)

- Características del sistema de recolección:

Limpieza con agua la parte inferior del filtro recibe el agua residual tratada y la conduce hacia el canal de evacuación principal. Deben hacerse provisiones para la limpieza de los desagües con agua. En filtros pequeños es aceptable el uso de un canal de carga periférica con ventilación vertical. Los sistemas de desagües inferiores podrían llegar a obstruirse por acumulación de grasa y crecimiento biológico. Esto, además de ser causa de obstrucción de la salida del efluente, conspira contra una buena ventilación del filtro. (Zumalacárregui, 2005)

### 5.3 lineamiento de diseño del filtros anaerobios de flujo ascendente:

Consiste en un tanque o cámara cerrada, compuesta por un lecho de piedra en donde el efluente proveniente del tanque séptico pasa de manera ascendente (de abajo hacia arriba), a través de una capa filtrante plástica o de piedras y la película biológica que se forma sobre la superficie de ellas (SENA, 2010)

Tabla 11. Límites para carga orgánica en FAFAS

Fuente: Tomada de reporte de Alejandro Rincón

Parámetro	Valor	Referencia
Carga orgánica	0.25-0.75kgDBO/(m <sup>3</sup> *d)	Andrade Neto (2004, p 102); Goncalves et al. (2001, p. 74, 75)
Carga orgánica	0.15-0.50kgDBO/(m <sup>3</sup> *d)	Andrade Neto, 2004, p. 102.

Tabla 12. Límites para carga hidráulica en Fafa

Fuente: Tomada de reporte de Alejandro Rincón

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Referencia</b>
Carga hidráulica	<10m/d	Gomez, Alvarez (2008), p. 34); Romero (1999, p. 708)
Carga hidráulica	<24m/d	Alvarado (2011), p. 12); Gutterer y cools. (2009, p 257).

**Definición de características de operación de los prototipos (carga orgánica y carga hidráulica)**

**5.4 Definiciones básicas:**

Caudal (Q), es la cantidad de volumen por unidad de tiempo cuyo valor es de 850 (L/día) el cual se llevará a las unidades (m<sup>3</sup>/día) para facilidad de los cálculos.

Área (A), es una medida de la superficie cuyo valor en los filtros anaerobios de flujo ascendente, tanques de pulso, tanques de distribución y filtro percolador es igual a 1(m<sup>2</sup>), mientras que para los humedales es de 1.392 (m<sup>2</sup>) ya que se toma parte del espacio ocupado por el filtro percolador existente (STARD).

Carga hidráulica (CH), es el volumen de agua aplicado por unidad de superficie en un determinado período de tiempo, la cual estará representada en (cm/día)

Carga orgánica (CO), es la cantidad de materia orgánica en un líquido en un determinado tiempo, la cual estará representada en (gDBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>\*día) para los filtros anaerobios y filtro percolador porque en los humedales será (gDBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>\*día).

Esquema general del tren de tratamiento de los prototipos.

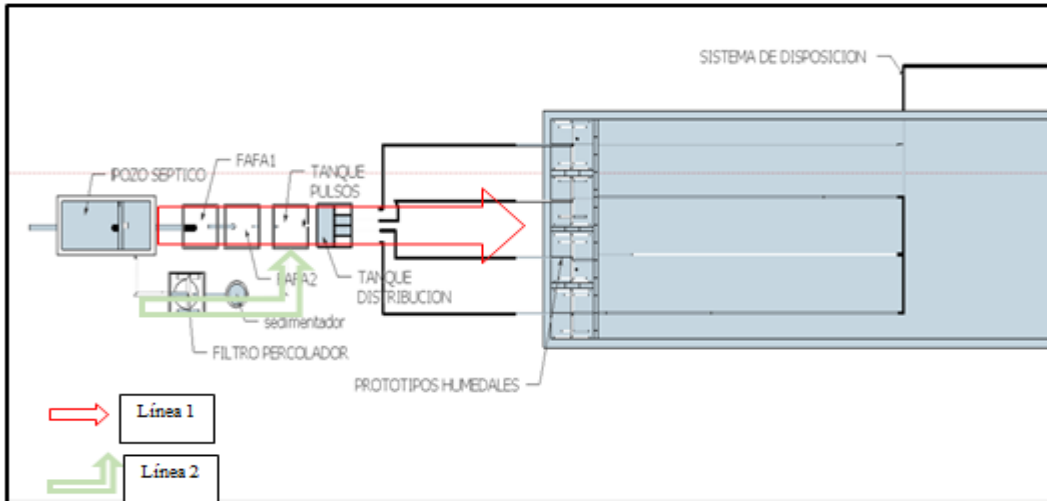


Ilustración 1. Tren de tratamiento

La línea 1 del tren de tratamiento consiste en un flujo de ARD que transita por los fafas 1 y 2, llegando hasta el tanque de pulsos, posteriormente pasa al tanque de distribución que divide el caudal en 4 partes iguales los cuales serán vertidos en los prototipos de humedales artificiales.

Mientras que la línea 2 de tratamiento consiste en tomar el efluente de ARD del pozo séptico direccionándolo hacia el prototipo de filtro percolador el cual descarga en un sedimentador y posteriormente llega al tanque de pulsos y tanque de distribución finalizando de igual manera que en la línea 1 a los 4 prototipos de humedales.

### Sección filtro anaerobio de flujo ascendente

Tabla 7. Filtro anaerobio de flujo ascendente

Nombre del sistema de tratamiento: Filtro anaerobio de flujo ascendente 1	
Carga hidraulica	Carga organica
$CH = \frac{Q}{A} * 100$	$CO = \frac{Q(\frac{m^3}{día}) * [DBO5(\frac{mg}{L})] * \frac{1000}{1} * \frac{1}{1000}}{A(m^2) * h(m)}$

$CH = \frac{Q(m^3)}{\text{día}}$ $CH = \frac{0.85(m^3)}{1\text{día}} * 100$ $CH = 85 \frac{cm}{\text{día}}$	$CO = \frac{0.85(\frac{m^3}{\text{día}}) * [350.5(\frac{mg}{L})] * \frac{1000}{1} * \frac{1}{1000}}{1m^2 * 1m}$ $CO = 297.92 \frac{gDBO5}{m^3 * \text{día}}$
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<b>Nombre del sistema de tratamiento: Filtro anaerobio de flujo ascendente 2</b>	
<b>Carga hidraulica</b>	<b>Carga organica</b>
$CH = \frac{Q}{A} * 100$ $CH = \frac{Q(m^3)}{\text{día}}$ $CH = \frac{0.85(m^3)}{1\text{día}} * 100$ $CH = 85 \frac{cm}{\text{día}}$	$CO = \frac{Q(\frac{m^3}{\text{día}}) * [DBO5(\frac{mg}{L})] * \frac{1000}{1} * \frac{1}{1000}}{A(m^2) * h(m)}$ $CO = \frac{0.85(\frac{m^3}{\text{día}}) * [167.9(\frac{mg}{L})] * \frac{1000}{1} * \frac{1}{1000}}{1m^2 * 1m}$ $CO = 142.71 \frac{gDBO5}{m^3 * \text{día}}$

**Sección filtro percolador**

Tabla 8. Filtro percolador

<b>Nombre del sistema de tratamiento: Filtro percolador</b>	
<b>Carga hidraulica</b>	<b>Carga organica</b>
$CH = \frac{Q(\frac{m^3}{\text{día}})}{A(m^2)} * 100$	$CO = \frac{Q(\frac{m^3}{\text{día}}) * [DBO5(\frac{mg}{L})] * \frac{1000}{1} * \frac{1}{1000}}{A(m^2) * h(m)}$

$CH = \frac{0.85 \frac{(m^3)}{día}}{1(m^2)} * 100$ $CH = 85 \frac{cm}{día}$	$CO = \frac{0.85 \frac{(m^3)}{día} * [350.5 \frac{(mg)}{L}] * \frac{1000}{1}}{1m^2 * 1m} * \frac{1}{1000}$ $CO = 297.92 \frac{gDBO5}{m^3 * día}$
-----------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### Seccion humedales artificiales

Tabla 9 Humedales artificiales de flujo subsuperficial

<b>Nombre del sistema de tratamiento: Humedales artificiales de flujo subsuperficial</b>	
<b>Carga hidraulica</b>	<b>Carga organica</b>
$CH = \frac{Q \frac{(m^3)}{día}}{A(m^2)} * 100$ $CH = \frac{0.2125 \frac{(m^3)}{día}}{1.392(m^2)} * 100$ $CH = 15.26 \frac{cm}{día}$	$CO = \frac{Q \frac{m^3}{día} * [DBO5 \frac{mg}{L}] * \frac{1000}{1}}{A(m^2)} * \frac{1}{1000}$ $CO = \frac{0.2125 \frac{m^3}{día} * [80.45 \frac{mg}{L}] * \frac{1000}{1}}{1.392(m^2)} * \frac{1}{1000}$ $CO = 12.28 \frac{gDBO5}{m^2 d}$

- Tubería: areas, calibres y dimensiones de la tubería para la entrada y salida del flujo, y tamaños de los orificios

Tabla 10. Tuberías, calibres y dimensiones de la tubería del sistema de tratamiento propuesto

<b>Fafas</b>	Diámetro tuberías entrada y salida: 2 Pulgadas Altura: 1 Metro
--------------	-------------------------------------------------------------------

	<p>Metros de tubería: 1,50 Metros</p> <p>Área Superficial: 0,84 <math>m^2</math></p>
<b>Tanque de Pulsos</b>	<p>Diámetro Tuberías entrada y salida: 1,2 Pulgadas</p> <p>Altura: 1 Metro</p> <p>Metros de tubería: 0,80 Metros</p> <p>Área superficial: 0,85 <math>m^2</math></p>
<b>Tanque de Distribución</b>	<p>Diámetro tubería entrada y salida: 1,2 Pulgadas</p> <p>Altura: 0,50 Metros</p> <p>Metros de tubería: 1,63 Metros</p> <p>área superficial: 0,78 <math>m^2</math></p>
<b>Humedales</b>	<p>Metros de tubería a la entrada: 4 Metros</p> <p>Metros de tubería en sistema de Distribución: 14, 16 Metros</p> <p>Metros de tubería en el sistema de Recolección: 9,92 Metros</p> <p>Metros de tubería para los dos humedales aireados: 4 Metros</p> <p>Diámetros tuberías entrada y salida: 1,2 Pulgadas</p> <p>Diámetro tubería en sistema de distribución y recolección: 1,2 pulgadas</p> <p>Altura: 1,51 Metros</p> <p>área superficial: 1,392 <math>m^2</math></p>

<b>Filtro Percolador</b>	Diámetro tuberías entrada y salida: 2 Pulgadas Altura: 1 Metro Metros de tubería: 1,50 Metros Área Superficial: 0,84 m <sup>2</sup>
--------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### 5.5 Esquemas de los prototipos:

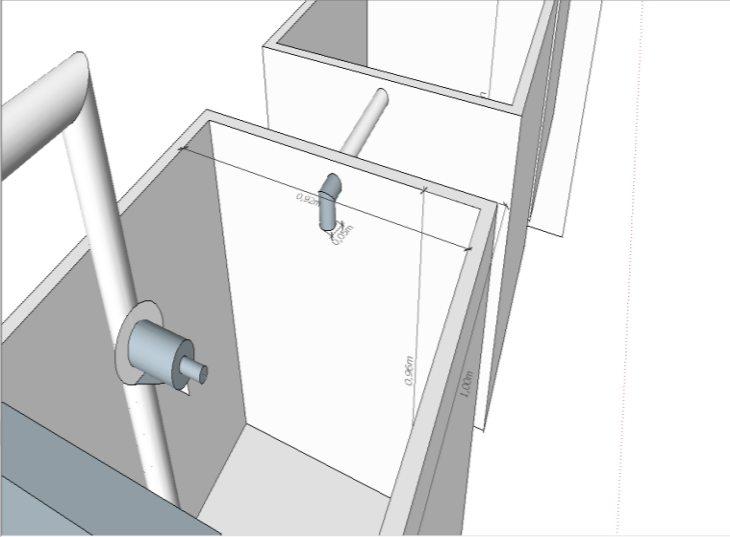
Realizar esquemas de cada prototipo, en al menos dos dimensiones, mostrando las características de estructura.

Tabla 11. Fafa

<p>FAFA 1 – 2</p> <p>CARACTERISTICAS DE ESTRUCTURA</p> <p>La estructura de los FAFAS es similar a los isotanques que se encuentran dentro de los catálogos comunes, con unas dimensiones aproximadas de 1 metro de altura y 1 metro de grosor. La tubería conecta con el pozo séptico, el flujo del agua residual es ascendente, en los dos sistemas y al otro lado se encuentra una tubería de captación del efluente.</p>	
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

<p>El material del lecho filtrante consiste en piedra con un tamaño desde 50-100mm, cuya densidad aproximadamente es de 1440Kg/m<sup>3</sup>; la superficie específica será de 40m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, la decisión de usar este tipo de material radica en la facilidad para extraer el material del río Campo alegre.</p>	
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Tabla 12. *Tanque pulsos*

<p><b>TANQUE DE PULSOS</b></p> <p><b>CARACTERISTICAS DE ESTRUCTURA</b></p> <p>La estructura del tanque toma el agua residual que ha pasado por los FAFAS, almacena el agua mientras por medio de pulsos la bomba hidráulica lleva el agua a un tanque de distribución, las características fisicoquímicas no</p>	
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------



cambian en absoluto. Este tendrá las mismas dimensiones de los FAFAS.

Tabla 13. *Tanque de distribución*

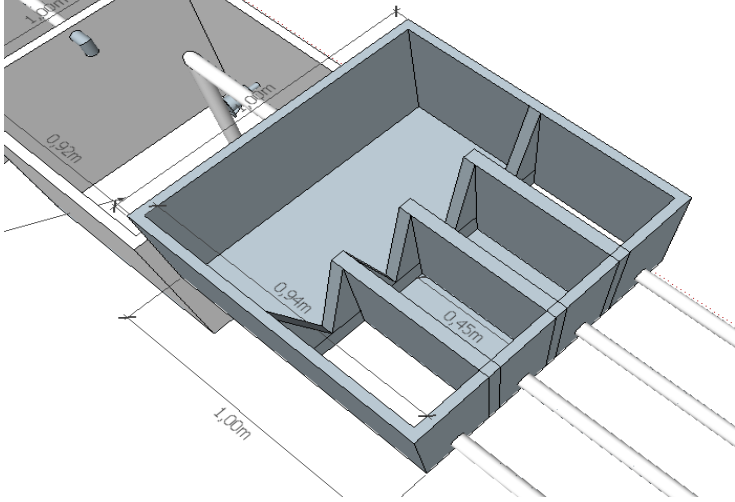
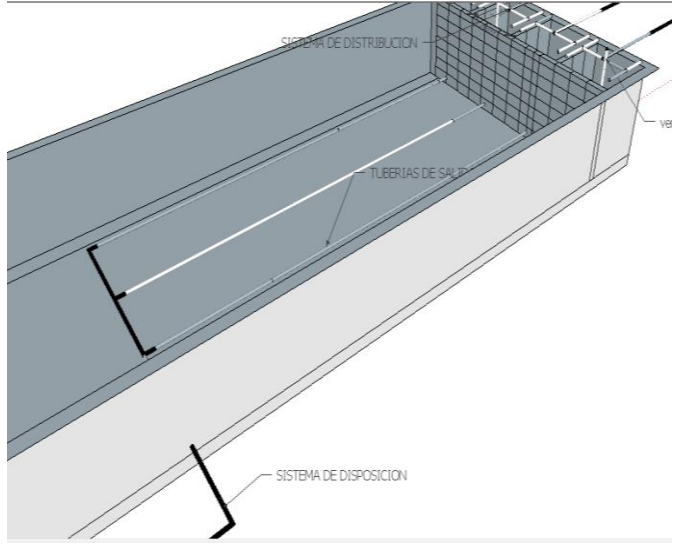
<p>TANQUE DE DISTRIBUCION</p> <p>CARACTERISTICAS DE ESTRUCTURA</p> <p>La estructura del tanque contiene cuatro vertederos triangulares que se encargan de entregar a los prototipos caudales iguales de ARD, la bomba entrega cada determinado tiempo un flujo que entra a una recamara, las condiciones del agua no cambian en absoluto.</p>	
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------

Tabla 14. *Prototipos de humedal sistema de distribución y recolección.*

PROTOTIPOS DE HUMEDALES CARACTERISTICAS DE ESTRUCTURA	
<p>La estructura de los prototipos es la misma para los 4 sistemas, el sistema de distribución consiste en una conexión de tuberías en forma de “H” la cual busca distribuir uniformemente el ARD por el humedal interactuando con el oxígeno que entra por las chimeneas en dos pero que solo lo poseen dos prototipos, en la parte inferior se encuentra el sistema de recolección cumpliendo la función de tomar las aguas depuradas que percolan a través del lecho filtrante, compuesto por arena y grava.</p>	

Tabla 15. Sistema de disposición.

<p><b>PROTOTIPOS DE HUMEDALES</b></p> <p><b>SISTEMA DE RECOLECCIÓN Y DISPOSICIÓN DE LAS ARD</b></p> <p><b>CARACTERISTICAS DE ESTRUCTURA</b></p> <p>El sistema de disposición transporta el ARD tratada que inicialmente es recogida dentro de las cámaras de los prototipos, con una inclinación del 1% el agua es llevada hacia afuera del filtro percolador existente y finalmente es depositada en el cuerpo de agua.</p>	 <p>El diagrama ilustra un sistema de disposición de ARD tratada en un humedal. Se muestra un canal con una inclinación del 1% que transporta el agua tratada. El sistema incluye un sistema de distribución (SISTEMA DE DISTRIBUCION) que recoge el agua de las cámaras de los prototipos, tuberías de salida (TUBERIAS DE SALIDA) que conducen el agua fuera del filtro percolador, y un sistema de disposición (SISTEMA DE DISPOSICION) que deposita el agua en el cuerpo de agua.</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

## FILTRO PERCOLADOR

### CARACTERISTICAS DE

### ESTRUCTURA

El prototipo de filtro percolador tiene las mismas dimensiones de construcción que los FAFAS, es un sistema de tratamiento secundario adicional el cual capta las aguas residuales del pozo séptico y por medio de un sistema de distribución en forma de "H" de flujo descendente remueve la carga orgánica y el efluente de este es conducido a un tanque de pulsos, y luego a un tanque de homogenización el cual lo distribuye a los humedales artificiales.

El material del lecho filtrante consiste en piedra con tamaños desde 50-100mm, cuya densidad aproximadamente es de  $1440\text{Kg/m}^3$ ; la superficie específica será de  $40\text{m}^2/\text{m}^3$ , la decisión de usar este tipo de material radica en la facilidad para extraer el material del río Campo alegre.

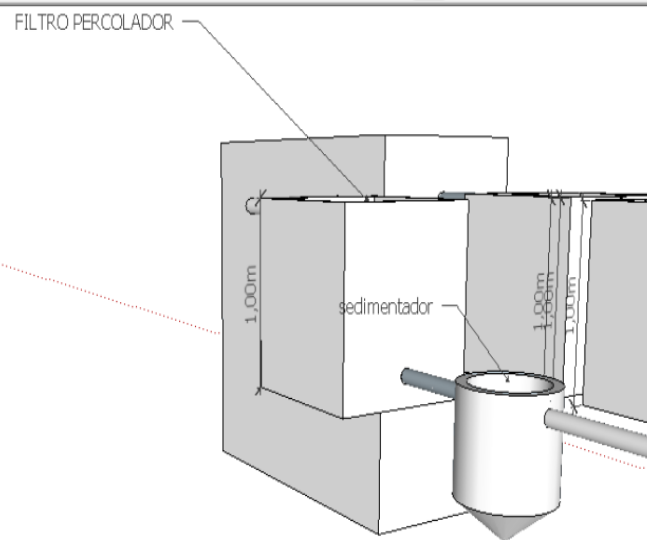
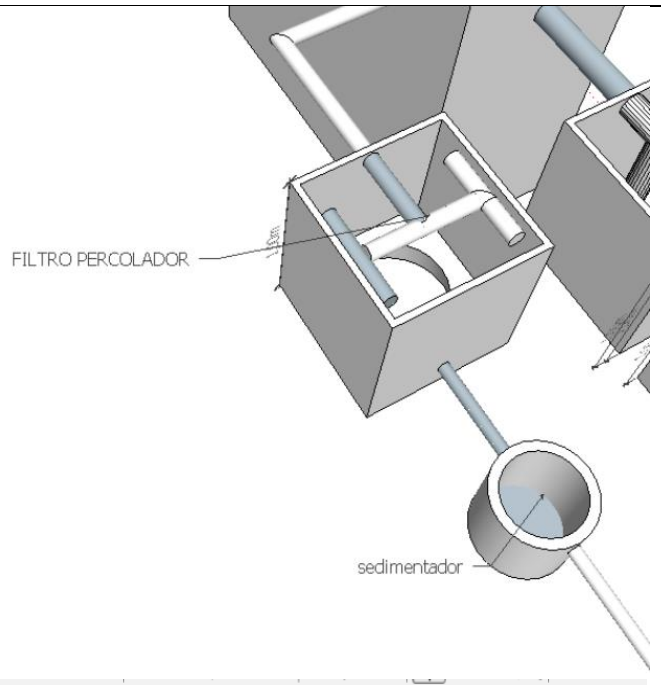


Tabla 16. *Características de los prototipos.*

<b>Características generales de los prototipos, niveles y variables de diseño</b>	
<p>Humedales artificiales de flujo subsuperficial</p>	<p>En consideración con los humedales de flujo superficial se determinó que la alimentación intermitente por medio de una bomba y las chimeneas de oxigenación facilitan el contacto de las aguas con la biopelícula y mejoran la capacidad de degradación de la materia orgánica.</p> <p>En la construcción de estos se plantea usar el espacio que se obtiene al reducir el tamaño del filtro percolador existente de ser posible usar material sobrante de la central hidroeléctrica de la CHEC, como cemento y ladrillos, separar por cámaras de 1,16x1,20 metros tomando en cuenta que los ladrillos a usar tengan unas dimensiones de 0,12x0,40 metros.</p> <p>Niveles o variables del diseño, prototipos con aireación y capas medias de arena entre 55cm y 65cm, además de prototipos sin tubo</p>

	de aireación con las mismas capas de arena intermedia 55cm y 65cm.
--	--------------------------------------------------------------------

## 5.8 Determinación y verificación de parámetros de operación

Comprende:

- Calcular el promedio de concentración de materia orgánica en el flujo de entrada a cada prototipo, con base en datos de materia orgánica.

### Revisar Excel interactivo presentado como anexo

Tabla 17. *Calculo de las concentraciones promedio en la entrada de los prototipos línea 1.*

CONCENTRACIONES A LA ENTRADA LINEA 1				
Unidades	caudal (L/día)	DBO5 (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
pozo séptico	850	390	828	192
FAFA 1	850	350.5	759	153.5
FAFA 2	850	167.92455	417.45	9.07185
Tanque de pulsos	850	80.45265191	229.5975	0.536146335
Tanque de distribución	850	80.45265191	229.5975	0.536146335
Humedal VFSS 1	212.5	80.45265191	229.5975	0.536146335
humedal VFSS 2	212.5	80.45265191	229.5975	0.536146335
Humedal VFSS 3	212.5	80.45265191	229.5975	0.536146335
Humedal VFSS 4	212.5	80.45265191	229.5975	0.536146335

Tabla 18. *Calculo de las concentraciones promedio en la entrada de los prototipos línea 2.*

CONCENTRACIONES A LA ENTRADA LINEA 2				
unidades	caudal (L/día)	DBO5 (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
pozo séptico	850	390	828	192
Filtro percolador	850	350.5	759	153.5

Tanque de pulsos	850	238.34	432.63	75.215
Tanque de distribución	850	238.34	432.63	75.215
Humedal VFSS 1	212.5	238.34	432.63	75.215
humedal VFSS 2	212.5	238.34	432.63	75.215
Humedal VFSS 3	212.5	238.34	432.63	75.215
Humedal VFSS 4	212.5	238.34	432.63	75.215

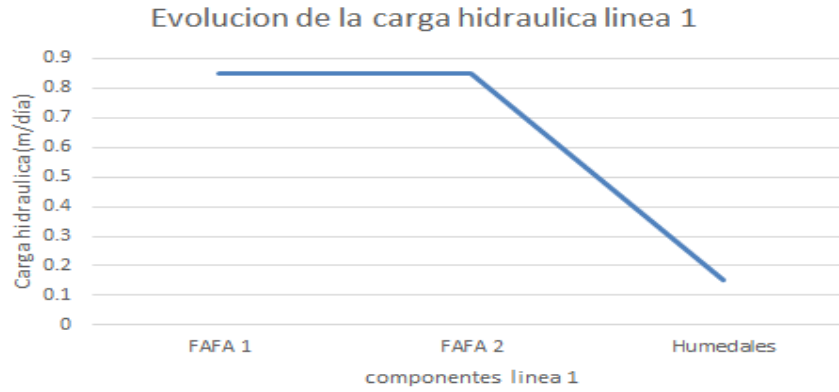
### 5.9 Comparación CH y B<sub>DBO</sub> con respecto a recomendaciones de diseño definidas en el primer objetivo.

Cargas teóricas	Cargas de los diseños	Observación
Carga hidráulica FAFA <10m/d Gómez, Álvarez (2008), p. 34); Romero (1999, p. 708)	Carga hidráulica FAFA 1 $0.85 \frac{m}{dia}$	Se encuentra por debajo del límite máximo sugerido
Carga hidráulica FAFA <10m/d Gómez, Álvarez (2008), p. 34); Romero (1999, p. 708)	Carga hidráulica FAFA 2 $0.85 \frac{m}{dia}$	Se encuentra por debajo del límite máximo sugerido
Carga hidráulica Filtro Percolador 0.04 – 0.2 m/h Rincón, 2018	Carga hidráulica Filtro Percolador $0.035 \frac{m}{h}$ $0.84 \frac{m}{dia}$	Esta cercano al valor sugerido
Carga hidráulica Humedales 8-30cm/d Arroyave (2010, p. 93)	Carga hidráulica Humedales $15.26 \frac{cm}{dia}$ $0.1526 \frac{m}{dia}$	Se encuentra dentro de los valores sugeridos

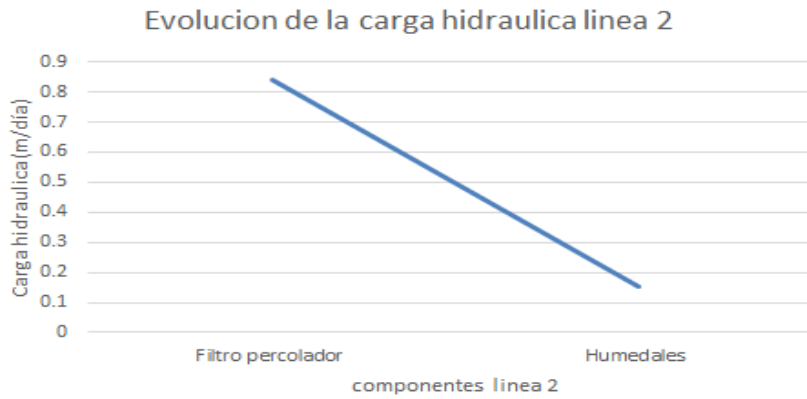
<p>Carga orgánica FAFA 0.25-0.75kgDBO/m<sup>3</sup>*d Andrade Neto (2004, p 102); Goncalves et al. (2001, p. 74, 75)</p>	<p>Carga orgánica FAFA 1 <math>0.29 \frac{kg}{m^3 * dia}</math></p>	<p>Se encuentra dentro de los valores sugeridos</p>
<p>Carga orgánica FAFA 0.25-0.75kgDBO/m<sup>3</sup>*d Andrade Neto (2004, p 102); Goncalves et al. (2001, p. 74, 75)</p>	<p>Carga orgánica FAFA 2 <math>0.14 \frac{kg}{m^3 * dia}</math></p>	<p>Es inferior al límite máximo recomendado</p>
<p>Carga orgánica Filtro Percolador 0.1-0.4 kgDBO5/m<sup>3</sup>*d Rincón, 2018</p>	<p>Carga orgánica Filtro Percolador <math>0.29 \frac{kg}{m^3 * dia}</math></p>	<p>Se encuentra dentro de los valores sugeridos</p>
<p>Carga orgánica Humedales 13.5gDBO5/m<sup>2</sup>*d Kivais (2001, p. 554)</p>	<p>Carga orgánica Humedales <math>12.28 \frac{gDBO5}{m^2 * dia}</math> <math>0.01228 \frac{kg DBO5}{m^2 * dia}</math></p>	<p>Es menor al límite máximo recomendado</p>

### 5.10 Grafica de la evolución de CH y BDBO.

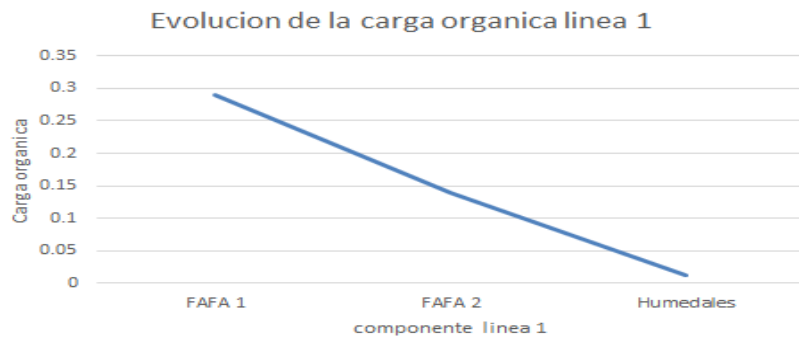




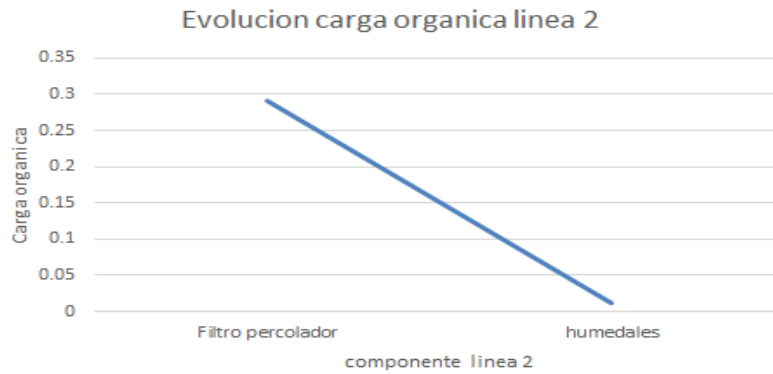
*Ilustración 2* Evolución carga hidráulica línea 1



*Ilustración 3* Evolución carga hidráulica línea 2



*Ilustración 4* Evolución carga orgánica línea 1



*Ilustración 5 Evolución carga orgánica línea 2*

- Evaluar las gráficas y datos y formular conclusiones

Las gráficas muestran como los valores de los diseños de los prototipos están por debajo de los límites máximos sugeridos para ambas cargas orgánica e hidráulica, la importancia de conocer la carga hidráulica de los diseños está sujeta al buen funcionamiento, factibilidad y durabilidad del humedal en la depuración del agua residual doméstica, para evitar así: la obstrucción del medio, el corto circuito en la alimentación y la disminución en la capacidad de eliminación en la mayoría de los parámetros DQO, DBO5 y SST (Nivala et al, 2012).

El aumento de carga hidráulica promueve el paso más rápido de las aguas residuales a través del lecho, reduciendo así el tiempo de contacto óptimo en los procesos de remoción (Saeeda y Sunc, 2012). Por el contrario, si la carga hidráulica disminuye se aumenta el tiempo de contacto óptimo y el proceso de remoción (Yan y Xu, 2014).

Mientras que la carga orgánica entre mayor sea, mayor será la relación de alimento con los microorganismos y más rápido crecerán las bacterias del humedal que consumen el sustrato; con altas cargas orgánicas se puede tener una menor concentración en el efluente tratado, si la

aireación, composición de sustrato u otro factor, no se convierten en limitantes. (Lara y Mazzoco, 2009).

### **5.11 Características fisicoquímicas del efluente del pozo séptico de la PTAR (Agua residual a tratar en los prototipos)**

Se requiere una caracterización inicial del agua residual que sale del pozo séptico, con el fin de dimensionar los prototipos. A este fin, se realiza un análisis de los datos obtenidos en el informe suministrado por la CHEC.

Los datos a continuación descritos fueron proporcionados por el informe estudio de caracterización de vertimientos líquidos realizado por el Grupo de investigación en agua y saneamiento, (GIAS), quien realizó el estudio de caracterización de aguas tratadas en la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas (PTARD) de la central hidráulica la Insula, ubicada en la vereda La Ínsula del municipio de Chinchiná, departamento de Caldas, a través de los servicios técnicos prestados por el Grupo de Investigación en Agua y Saneamiento de la Universidad Tecnológica de Pereira.

#### **Medición de caudal.**

El caudal del Efluente del pozo séptico en promedio tiene un valor de 0.049 (L/s). Por lo tanto se tomara el 20% de la cantidad de ARD para ingresarla a los prototipos siendo más exacto un valor de 850 (L/día).

#### **Medición de pH y temperatura in situ.**

El pH del efluente del pozo séptico en promedio es de 6.52 mientras que la temperatura de las ARD es de 22.94 °C.

- La carga contaminante fue extraída del informe de caracterización de vertimientos líquidos realizado por el grupo de investigación en agua y saneamiento (GIAS) en la central hidráulica la Insula. Municipio de Chinchiná, Caldas.

Tabla 19. Concentraciones efluente del pozo séptico

Ensayo	Unidad	Efluente pozo séptico		Promedio de concentración para los prototipos
		am/pm		
DBO5	mgDBO5/L	323	378	350.5
DQO	mgDQO/L	706	812	759
SST	mgSST/L	142	185	153.5
GyA	mgGyA/L	61.5	95.2	28.05

Se presente el valor de la carga contaminante vertida por el Efluente del Tanque Séptico al lecho filtrante, el cual fue de 1.475 Kg DBO<sub>5</sub>/día; 3,195 Kg DQO/día; 0,688 Kg SST/día y 0.330 Kg G&A/día.

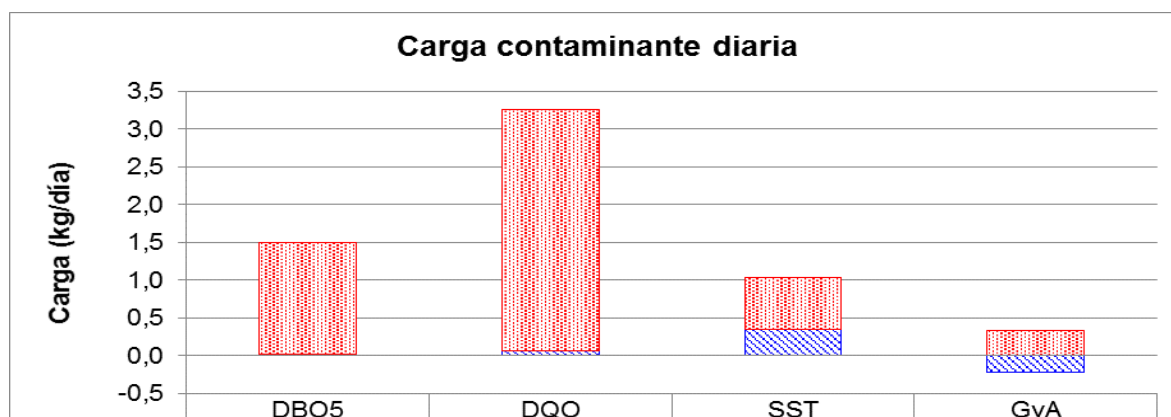


Ilustración 6. Cargas contaminantes diarias en el Efluente Tanque Séptico.

### 5.12 Diagrama cualitativo (Realizado por medio del software PowerPoint)

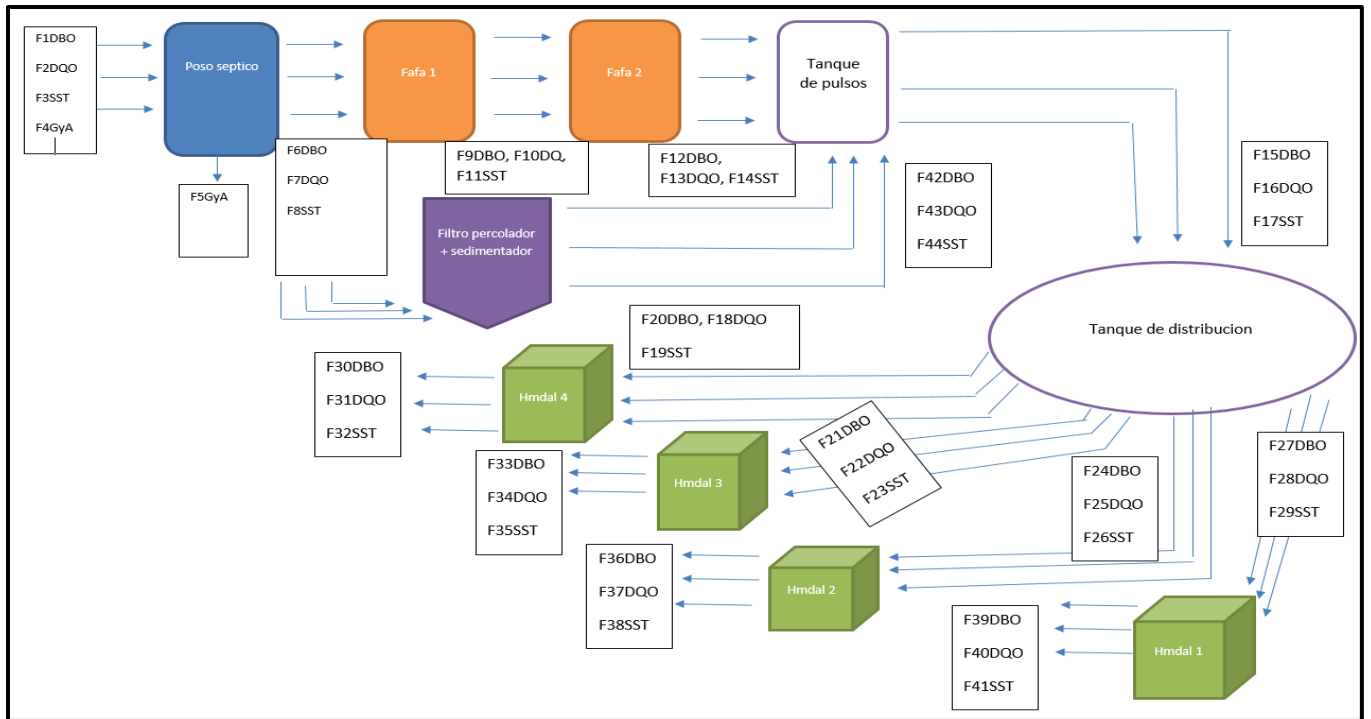


Ilustración 7. Diagrama cualitativo.

### 5.12 Diagrama cuantitativo (Realizado por medio del software PowerPoint)

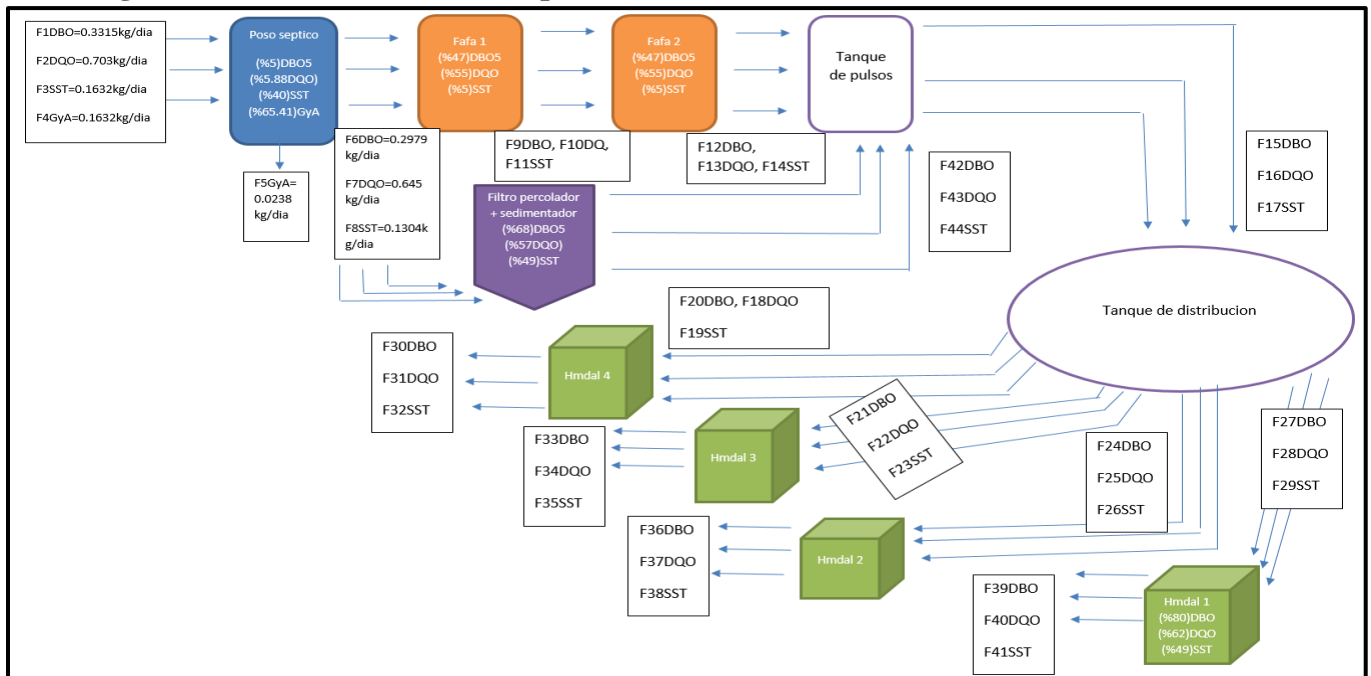


Ilustración 8. Diagrama cuantitativo.

### 5.13 Tabla de grados de libertad

Tabla grados de libertad prototipos insula central de la CHEC										
	UNIDADES									
	pozo septico	filtro percolador	FAFA 1	FAFA 2	Tanque de pulsos	Tanque de distribucion	Humedal VFSS 1	Humedal VFSS 2	Humedal VFSS 3	Humedal VFSS 4
NVI	8	6	6	6	NR	15	6	6	6	6
NBMI	4	3	3	3	NR	3	3	3	3	3
NFC	8	0	3	0	NR	0	0	0	0	0
NCI	0	0	0	0	NR	0	0	0	0	0
NRC	0	3	3	3	NR	0	3	3	3	3
RD	0	0	0	0	NR	15	0	0	0	0
GL	8-12=-4	6-6=0	6-9=-3	6-6=0	NR	15-18=-3	6-6=0	6-6=0	6-6=0	6-6=0
Diagnostico	Sobre especificado	Correctamente especificado	sobre especificado	correctamente especifico	NR	sobre especificado	Correctamente especifica	Correctamente especificada	Correctamente especificada	Correctamente especifica

Ilustración 9. Tabla de grados de libertad.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Balances de materia.

Tabla 20. Ecuación número 1.

Ecuación de balances 1	
$W=Q \cdot C_i \cdot 0,000001$	
w	(Kg/día)
Q	(L/día)
C	(mg/L)
FC	0.000001

Tabla 21. Ecuación número 2.

Ecuación de balances 2	
$W=(\%/100) \cdot W_j$	
W	(Kg/día)
%/100	(adimensional)
Wj	(Kg/día)

Tabla 22. Ecuación número 3.

Ecuación de balances 3	
$C_i = W * FC_2 / Q$	
w	(Kg/día)
Q	(L/día)
C	(mg/L)
FC2	1000000

Tabla 23. Porcentajes de remoción de los prototipos.

PORCENTAJES DE REMOCION		DBO5	DQO	SST	GyA	citas
Unidades	pozo séptico	0.05	5.88	40.03	65.41	(calculado del informe de la CHEC, 2017)
	filtro percolador	0.68	0.57	0.49	N/A	
	FAFA 1	0.4791	0.55	0.0591	N/A	(Alvarado, 2011)
	FAFA 2	0.4791	0.55	0.0591	N/A	(Alvarado, 2011)
	Tanque de pulsos	N/A	N/A	N/A	N/A	NR
	Tanque de distribución	N/A	N/A	N/A	N/A	NR
	Humedal VFSS 1 (55cm) Aireado	0.89	0.92	0.89	N/A	(García, 2010)
	humedal VFSS 2 (65cm) Aireado	0.98	0.95	0.89	N/A	(García, 2010)
	Humedal VFSS 3 (55cm) Sin Airear	0.96	0.91	0.85	N/A	(Bohórquez, 2015)
Humedal VFSS 4 (65cm) Sin Airear	0.98	0.9	0.85	N/A	(Paredes, 2014)	

		PARAMETROS ENTRADA							
		Cuadal (L/dia)	WDBO5 (Kg/dia) línea 1	WDBO5 (Kg/dia) línea 2	WDQO (Kg/dia) línea 1	WDQO (Kg/dia) línea 2	WSST (Kg/dia) línea 1	WSST (Kg/dia) línea 2	WGyA (Kg/dia)
Unidades	pozo septico	850	0.3315	0.3315	0.7038	0.7038	0.1632	0.1632	0.027285
	filtro percolador	850	NA	0.297925	NA	0.64515	NA	0.130475	N/A
	FAFA 1	850	0.297925	NA	0.64515	NA	0.130475	NA	N/A
	FAFA 2	850	0.142735868	NA	0.3548325	NA	0.007711073	NA	N/A
	Tanque de pulsos	850	0.068384754	0.202589	0.195157875	0.3677355	0.000455724	0.06393275	N/A
	Tanque de distribución	850	0.068384754	0.202589	0.195157875	0.3677355	0.000455724	0.06393275	N/A
	Humedal VFSS 1	212.5	0.068384754	0.202589	0.195157875	0.3677355	0.000455724	0.06393275	N/A
	humedal VFSS 2	212.5	0.068384754	0.202589	0.195157875	0.3677355	0.000455724	0.06393275	N/A
	Humedal VFSS 3	212.5	0.068384754	0.202589	0.195157875	0.3677355	0.000455724	0.06393275	N/A
	Humedal VFSS 4	212.5	0.068384754	0.202589	0.195157875	0.3677355	0.000455724	0.06393275	N/A

Ilustración 10. Cargas de entrada del sistema de tratamiento propuesto

PARAMETROS SALIDA						
WDBO5 (Kg/dia) línea 1	WDBO5 (Kg/dia) línea 2	WDQO (Kg/dia) línea 1	WDQO (Kg/dia) línea 2	WSST (Kg/dia) línea 1	WSST (Kg/dia) línea 2	WGyA (Kg/dia)
0.297925	2.98E-01	0.64515	0.64515	0.130475	0.130475	0.0238425
NA	0.202589	NA	0.3677355	NA	0.06393275	N/A
0.142735868	NA	0.3548325	NA	0.007711073	NA	N/A
0.068384754	NA	0.195157875	NA	0.000455724	NA	N/A
0.068384754	0.202589	0.195157875	0.3677355	0.000455724	6.39E-02	N/A
0.068384754	0.202589	0.195157875	0.3677355	0.000455724	0.06393275	N/A
0.060862431	0.18030421	0.179545245	0.33831666	0.000405595	0.056900148	N/A
0.067017059	0.19853722	0.185399981	0.349348725	0.000405595	0.056900148	N/A
0.065649364	0.19448544	0.177593666	0.334639305	0.000387366	0.054342838	N/A
0.067017059	0.19853722	0.175642088	0.33096195	0.000387366	0.054342838	N/A

Ilustración 11. Cargas de salida del sistema de tratamiento propuesto.

		PARAMETROS ENTRADA							
		caudal (L/dia)	DBO5 (mg/L) línea 1	DBO5 (mg/L) línea 2	DQO (mg/L) línea 1	DQO (mg/L) línea 2	SST (mg/L) línea 1	SST (mg/L) línea 2	GyA (mg/L)
Unidades	pozo septico	850	390	390	828	828	192	192	32.1
	filtro percolador	850	NA	350.5	NA	759	NA	153.5	N/A
	FAFA 1	850	350.5	NA	759	NA	153.5	NA	N/A
	FAFA 2	850	167.92455	NA	417.45	NA	9.07185	NA	N/A
	Tanque de pulsos	850	80.45265191	238.34	229.5975	432.63	0.536146335	75.215	N/A
	Tanque de distribución	850	80.45265191	238.34	229.5975	432.63	0.536146335	75.215	N/A
	Humedal VFSS 1	212.5	80.45265191	238.34	229.5975	432.63	0.536146335	75.215	N/A
	humedal VFSS 2	212.5	80.45265191	238.34	229.5975	432.63	0.536146335	75.215	N/A
	Humedal VFSS 3	212.5	80.45265191	238.34	229.5975	432.63	0.536146335	75.215	N/A
	Humedal VFSS 4	212.5	80.45265191	238.34	229.5975	432.63	0.536146335	75.215	N/A

Ilustración 12. Concentraciones de entrada del sistema de tratamiento propuesto.



PARAMETROS SALIDA							
Cuadal (L/dia)	DBO5 (mg/L) línea 2	DBO5 (mg/L) línea 1	DQO(mg/L) línea 2	DQO (mg/L) línea 1	SST (mg/L) línea 2	SST (mg/L) línea 1	GyA (mg/L)
850	350.5	350.5	759	759	153.5	153.5	28.05
850	238.34	NA	432.63	NA	75.215	NA	N/A
850	NA	167.92455	NA	417.45	NA	9.07185	N/A
850	NA	80.45265191	NA	229.5975	NA	0.536146335	N/A
850	238.34	80.45265191	432.63	229.5975	75.215	5.36E-01	N/A
850	238.34	80.45265191	432.63	229.5975	75.215	0.536146335	N/A
212.5	212.1226	71.6028602	398.0196	211.2297	66.94135	0.477170238	N/A
212.5	233.5732	78.84359887	410.9985	218.117625	66.94135	0.477170238	N/A
212.5	228.8064	77.23454583	393.6933	208.933725	63.93275	0.455724385	N/A
212.5	233.5732	78.84359887	389.367	206.63775	63.93275	0.455724385	N/A

Ilustración 13. Concentraciones de salida del sistema de tratamiento propuesto.

Fuente: Excel interactivo presentado como anexo

## 6.2 Evaluación de la eficiencia de todo el sistema por medio del balance global (pozo séptico, trampa grasas, humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical y filtro percolador)

**Comparación de la eficiencia de remoción de contaminantes del agua residual de la ínsula en los diferentes sistemas de tratamiento.**

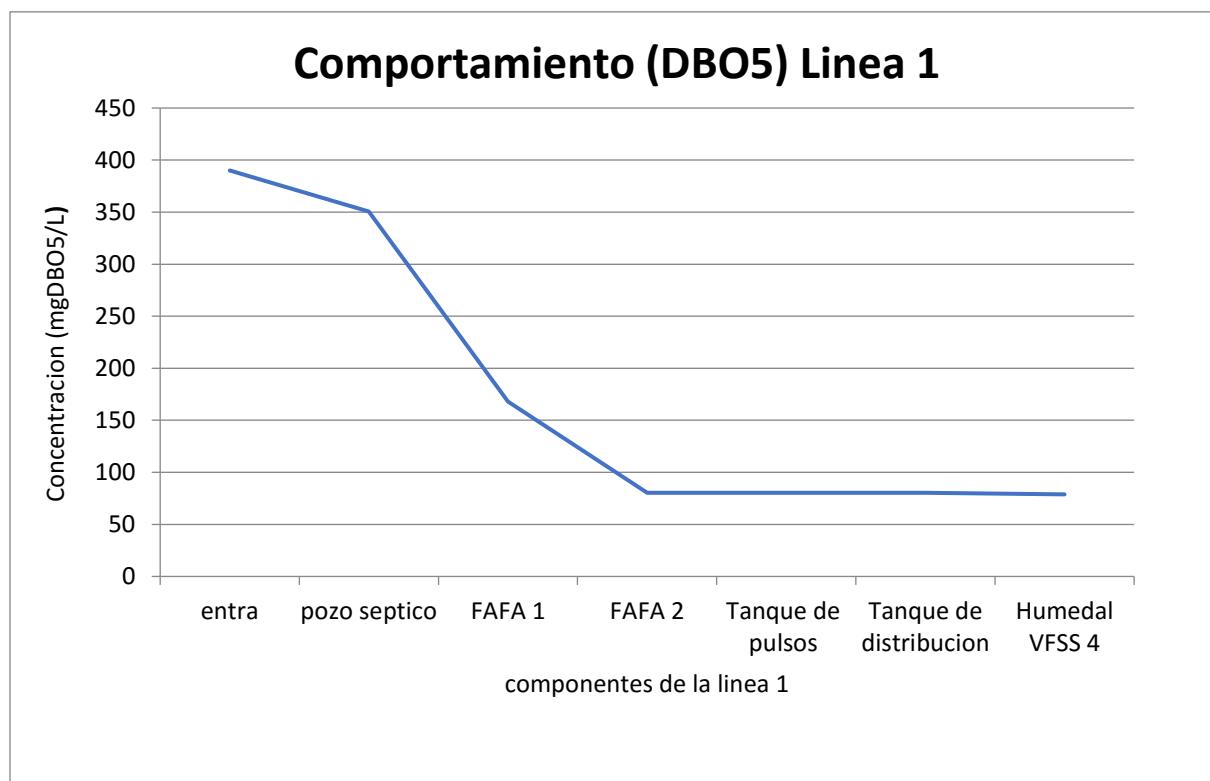
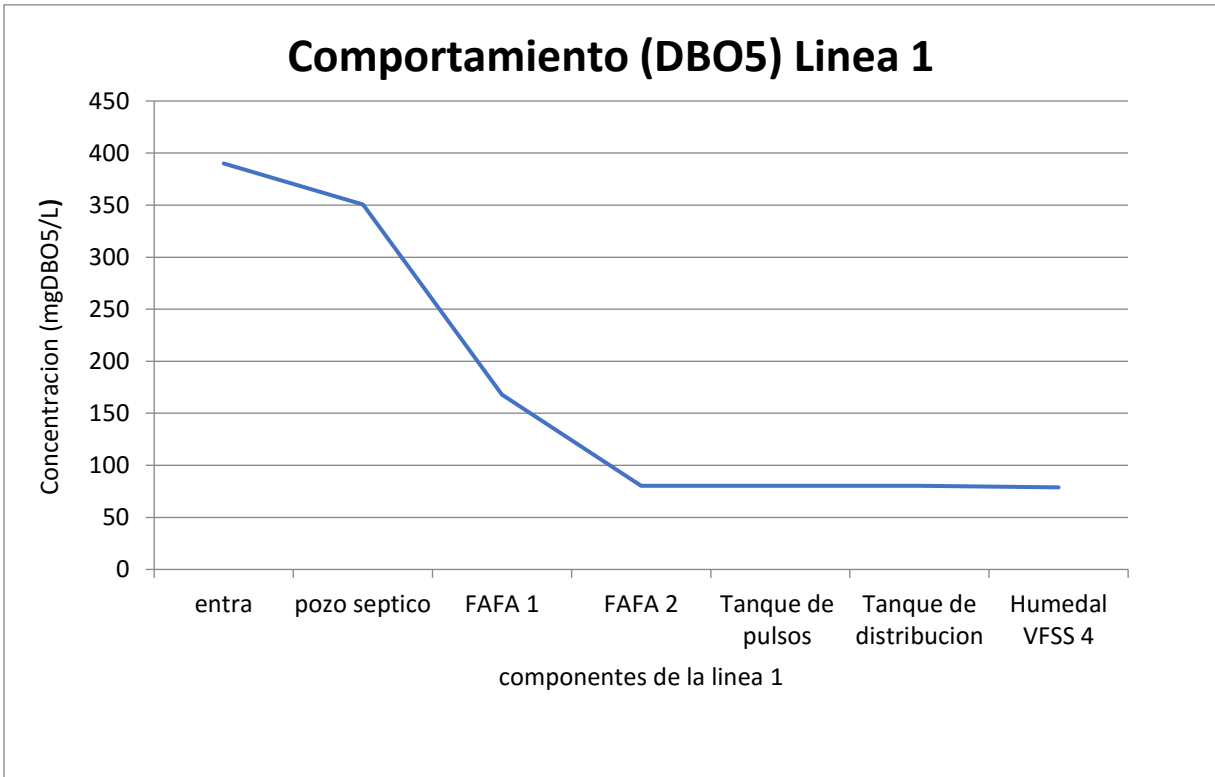
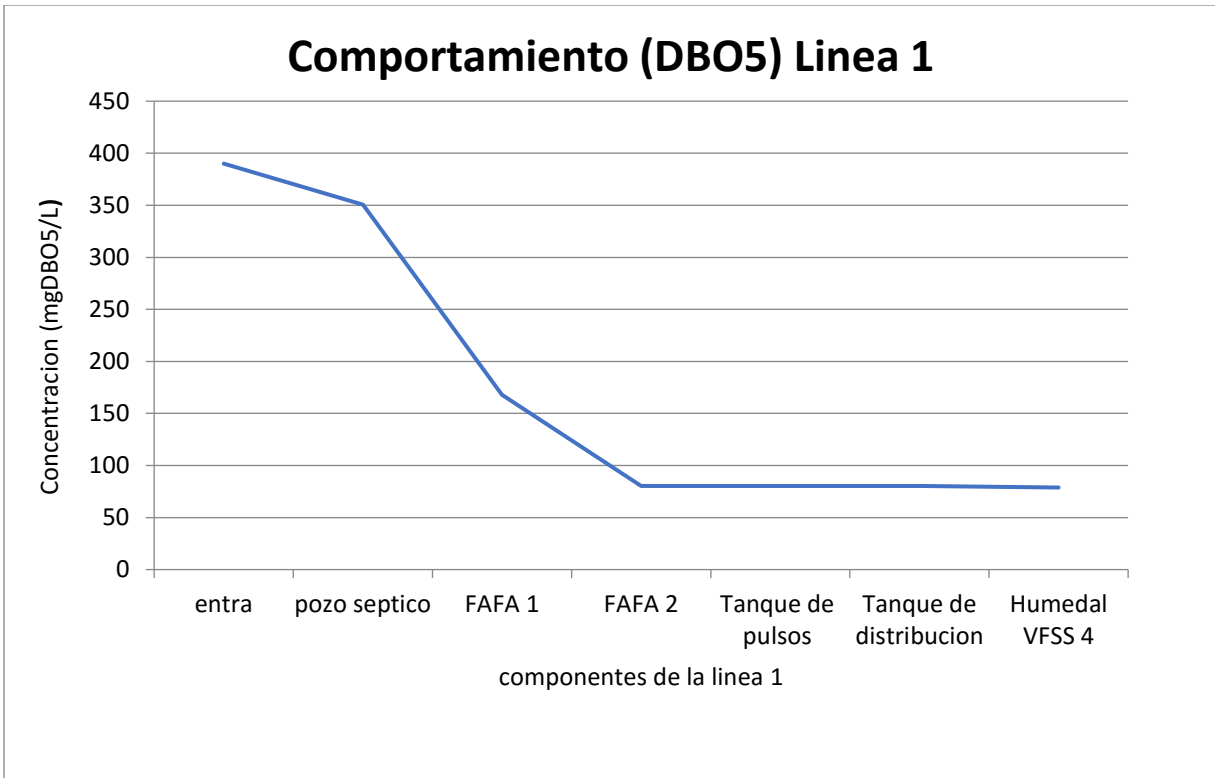


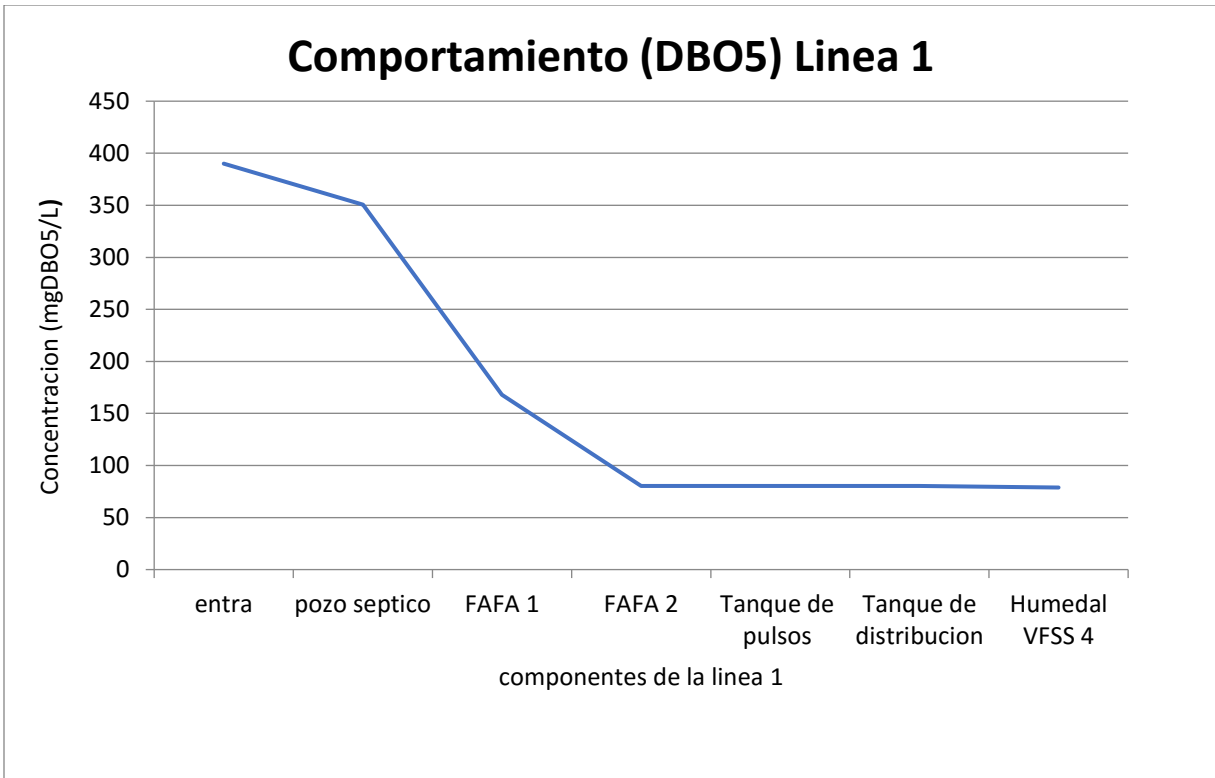
Ilustración 14. Remoción DBO5 vs sistemas de tratamiento 1.



*Ilustración 15.* Remoción DBO5 vs sistemas de tratamiento 2.



*Ilustración 16.* Remoción de DBO5 vs sistemas de tratamiento 3.



*Ilustración 17.* Remoción de DBO5 vs sistemas de tratamiento 4.

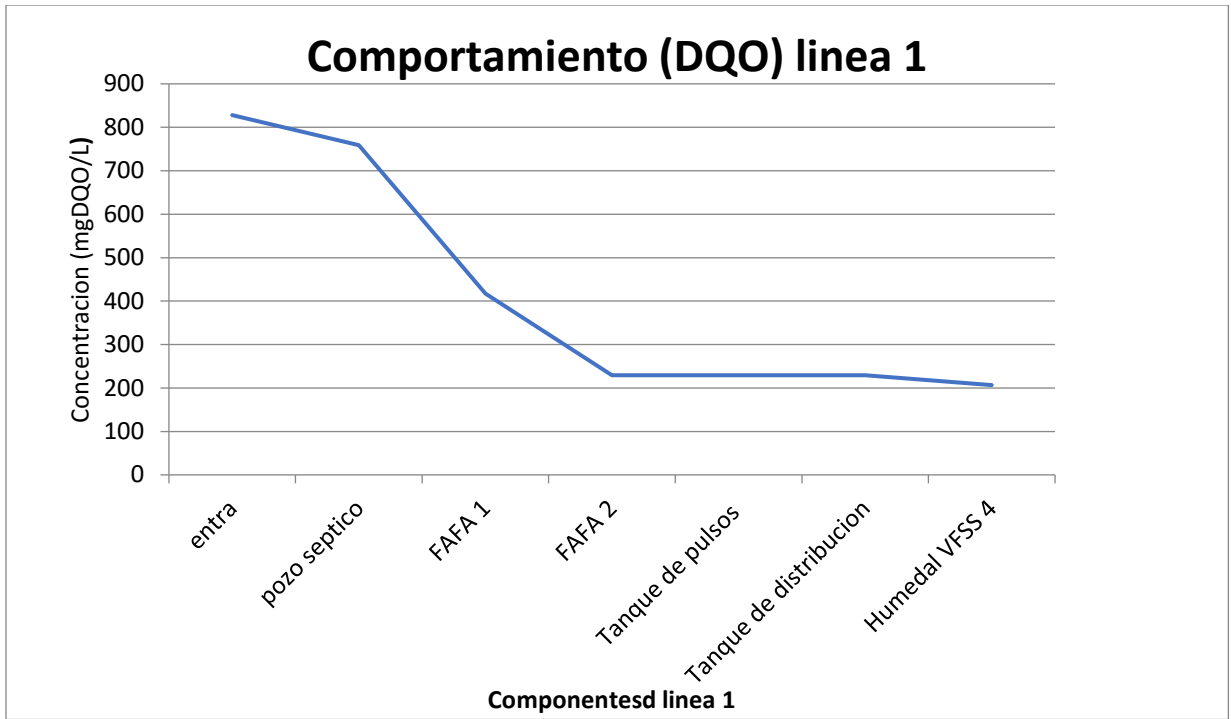


Ilustración 18. Remoción de DQO vs sistemas de tratamiento 1.

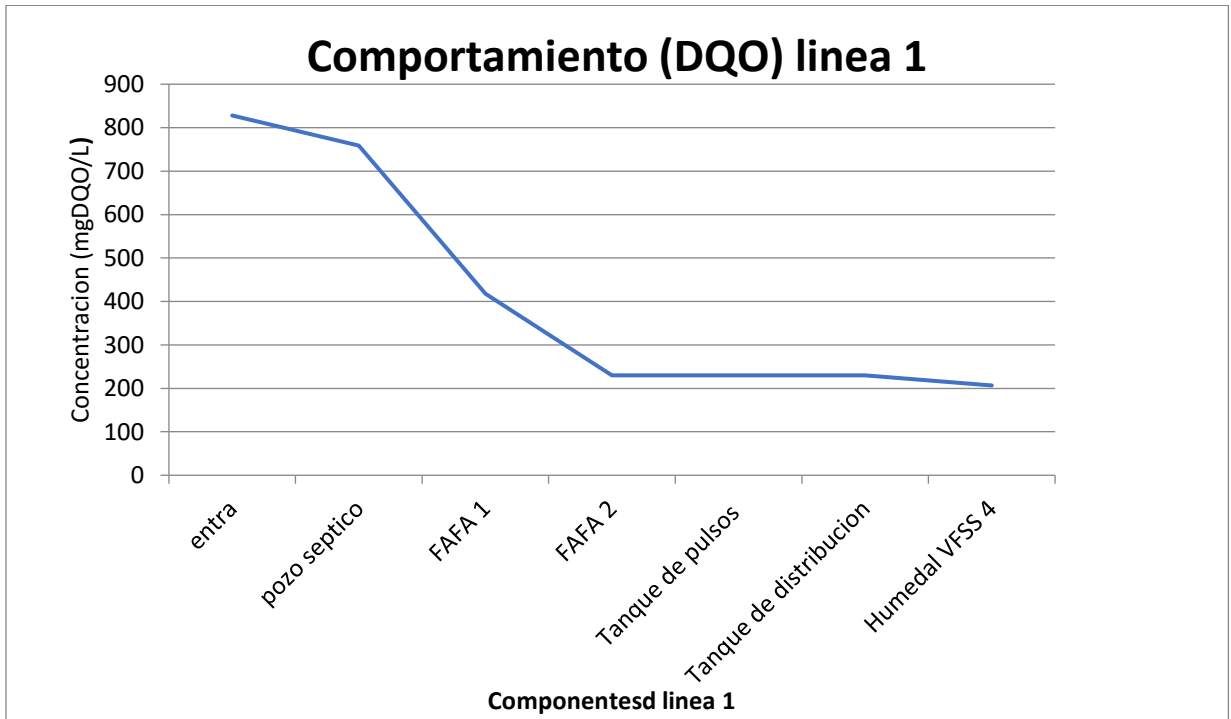


Ilustración 19. Remoción de DQO vs sistemas de tratamiento 2.

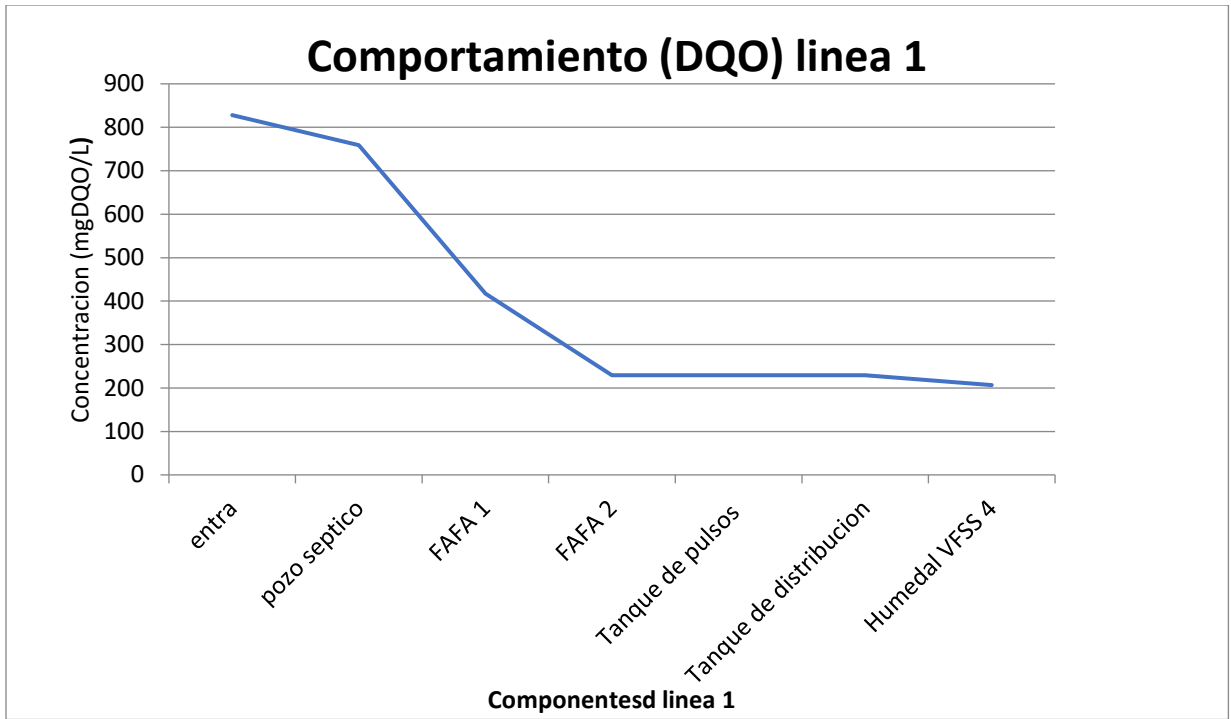


Ilustración 20. Remoción de DQO sistemas de tratamiento 3.

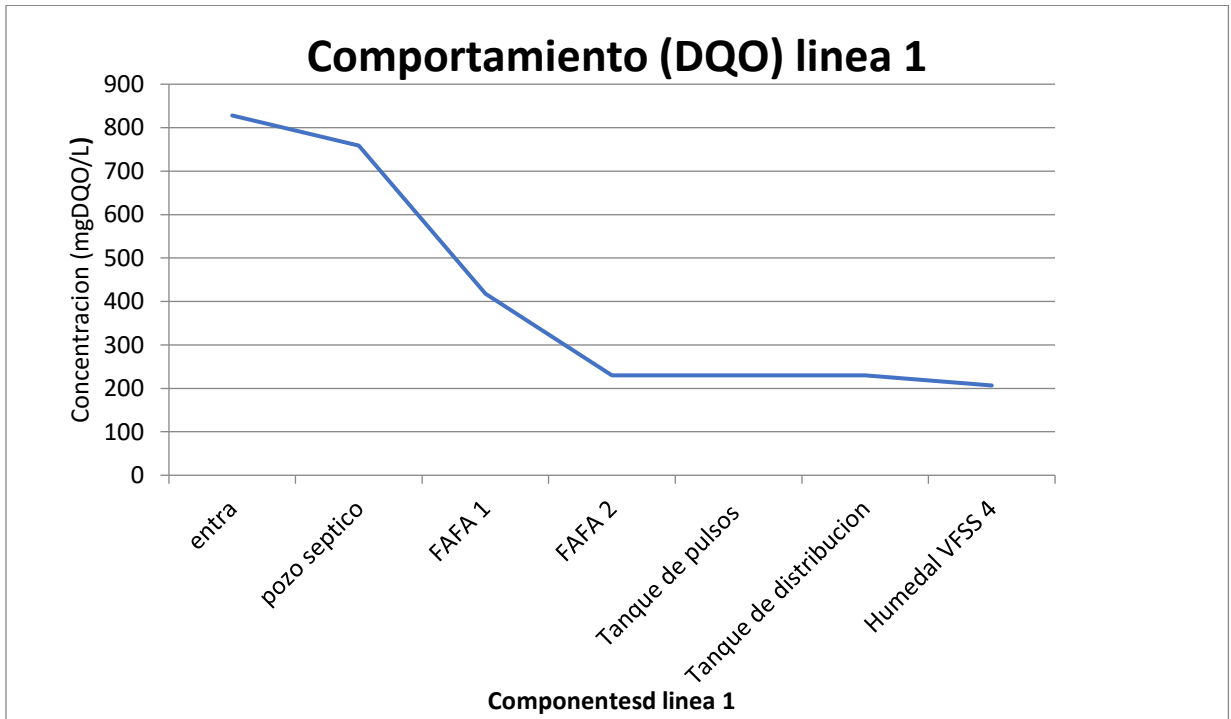


Ilustración 21. Remoción de DQO vs sistemas de tratamiento 4.

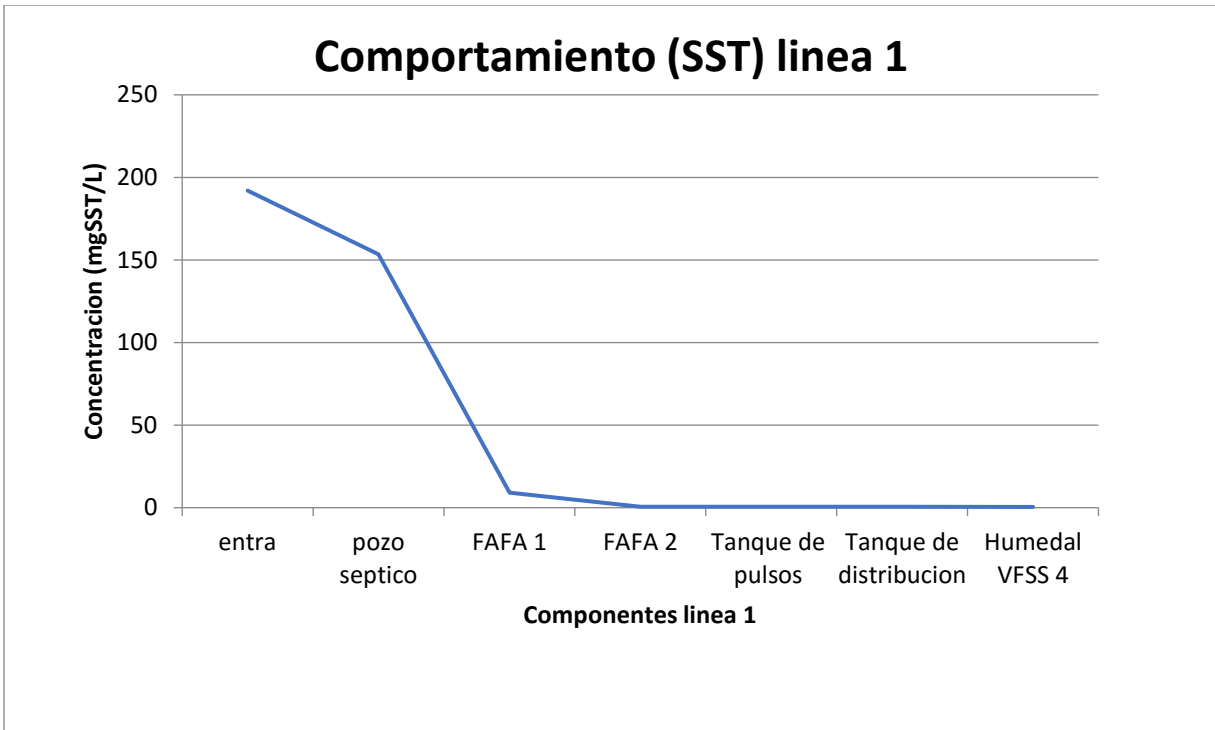


Ilustración 22. Remoción de SST vs sistemas de tratamiento 1.

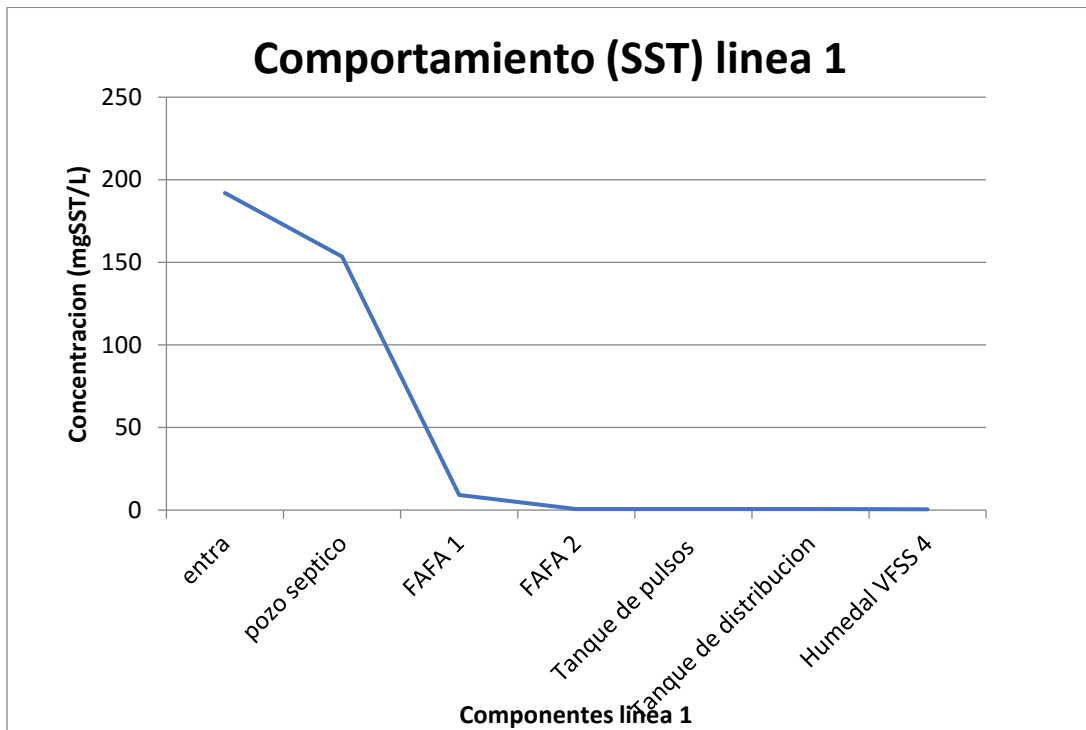
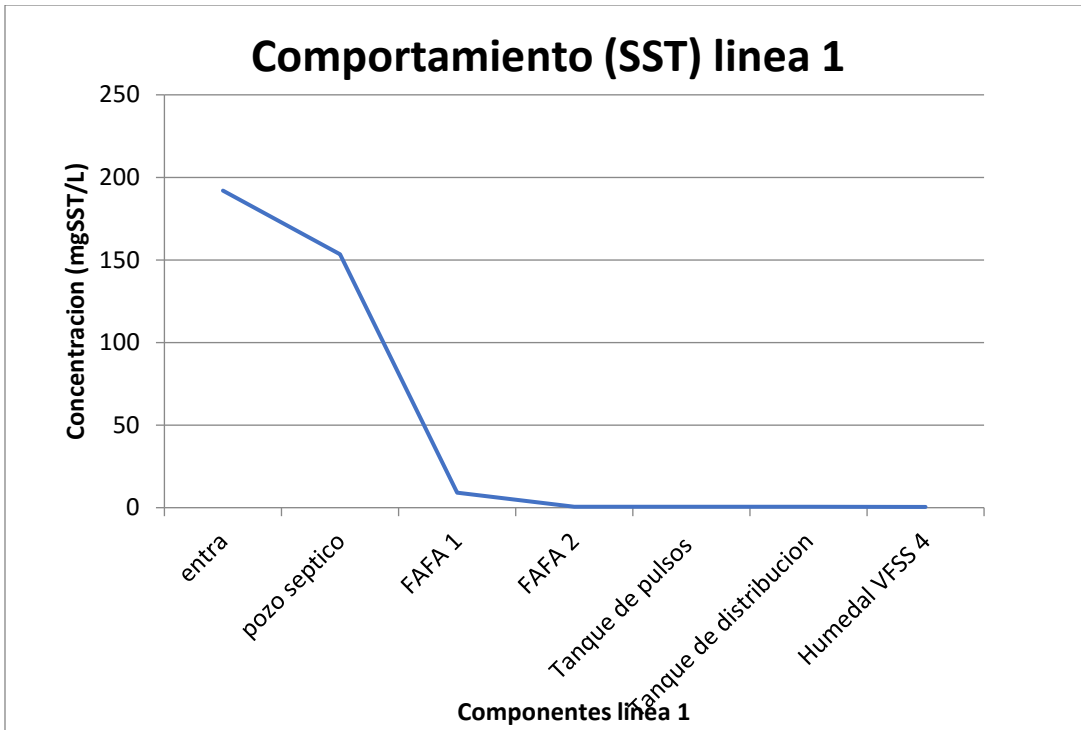
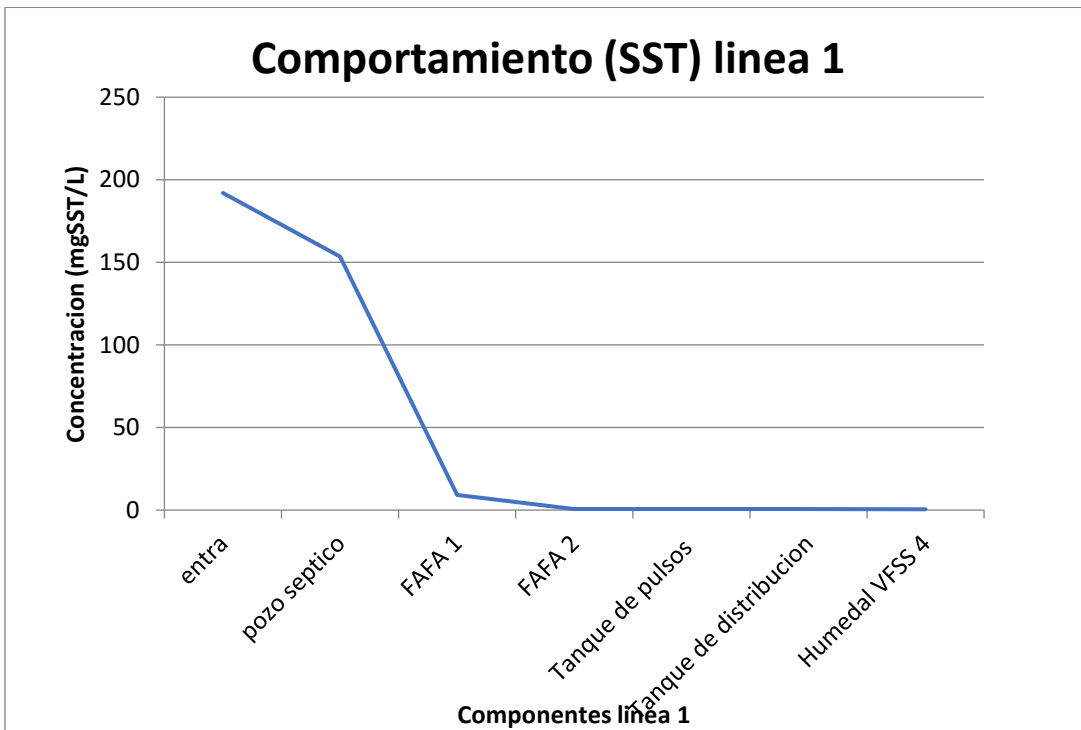


Ilustración 23. Remoción de SST vs sistema de tratamiento 2.

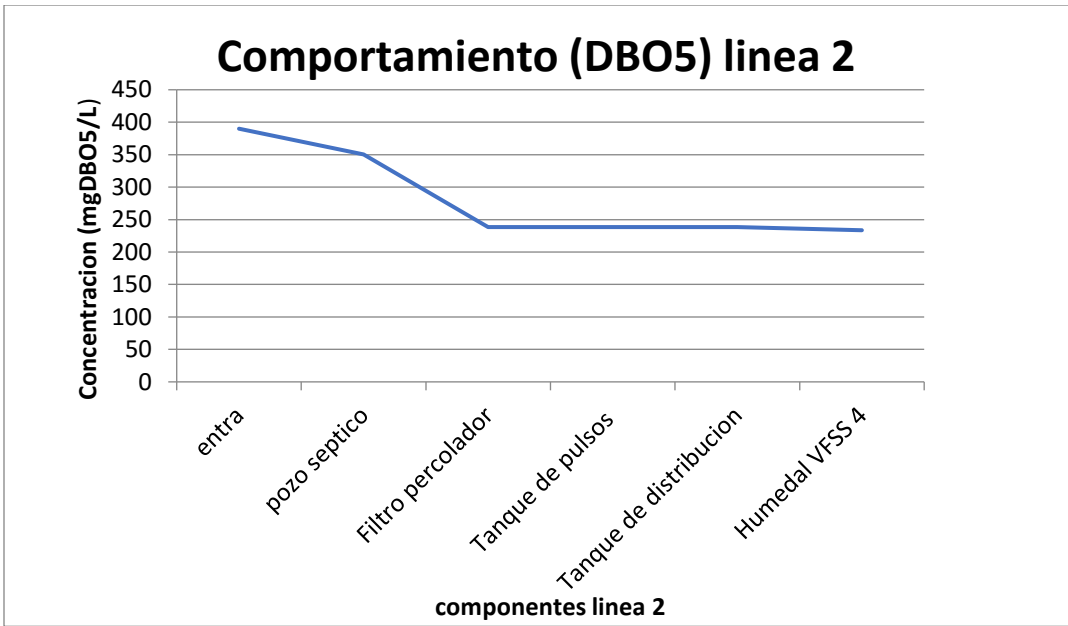


*Ilustración 24. Remoción de SST vs sistemas de tratamiento 3.*

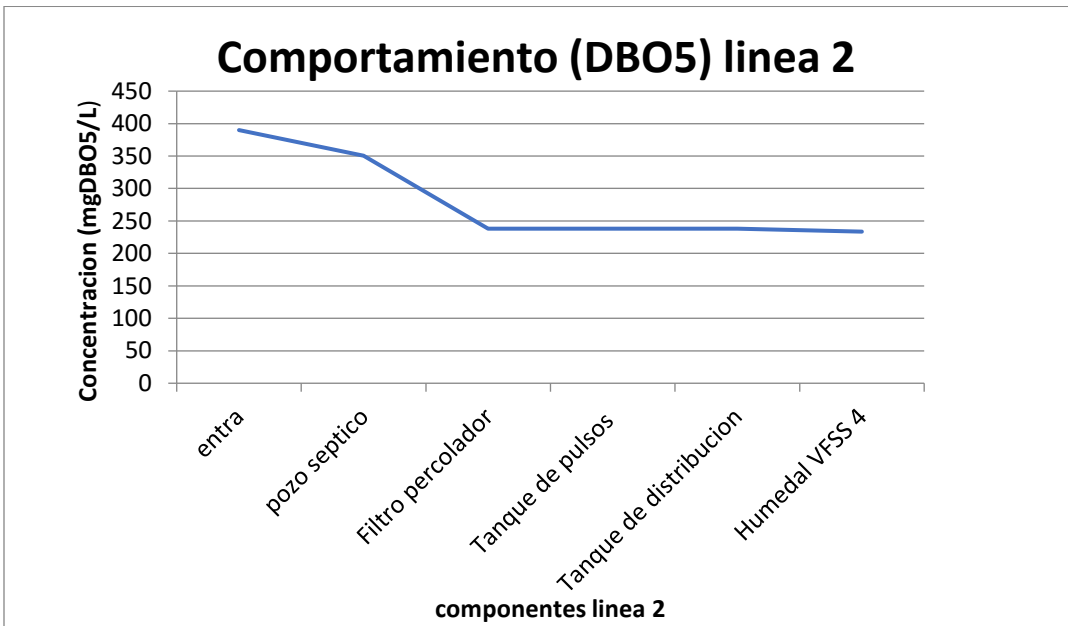


*Ilustración 25. Remoción de SST vs sistemas de tratamiento 4.*





*Ilustración 26.* Remoción de DBO5 vs sistemas de tratamiento línea 2 (1).



*Ilustración 27.* Remoción de DBO5 vs sistemas de tratamiento línea 2 (2).

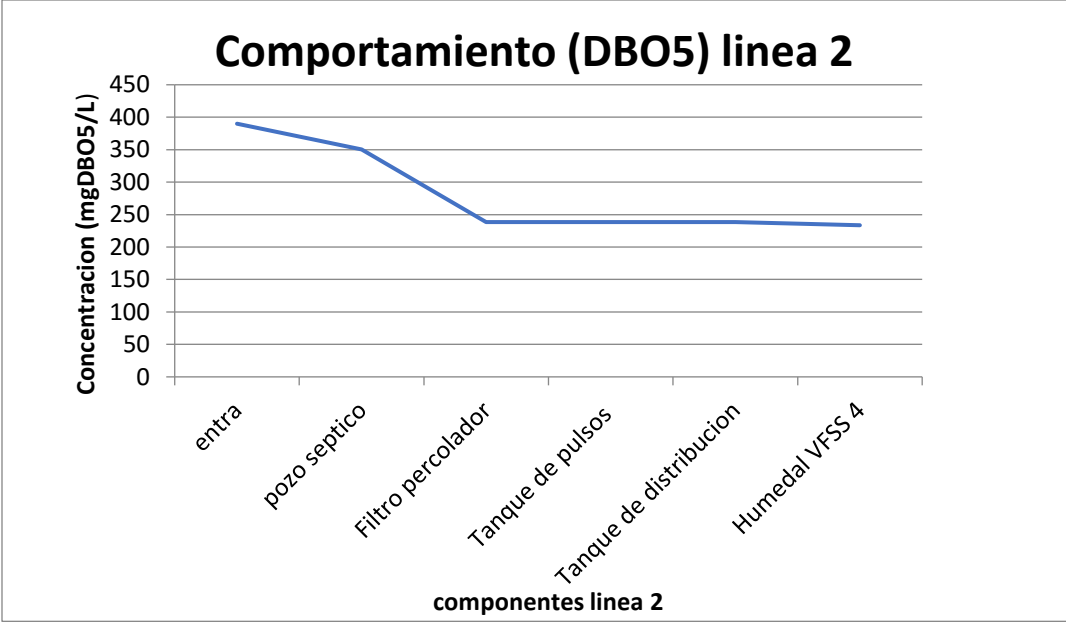


Ilustración 28. Remoción de DBO5 vs sistemas de tratamiento línea 2 (3).

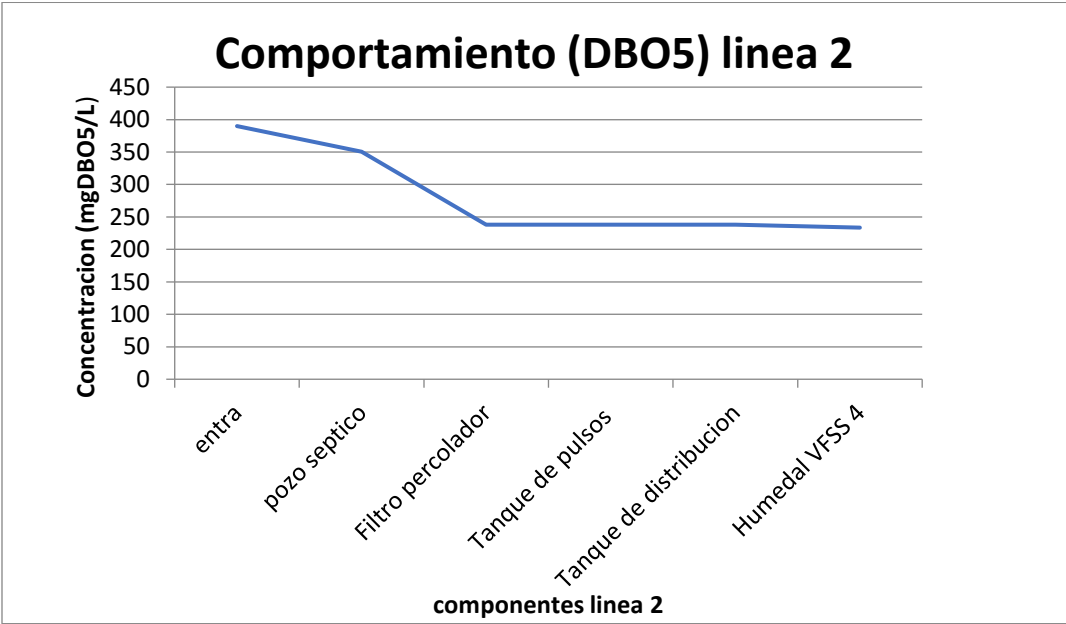
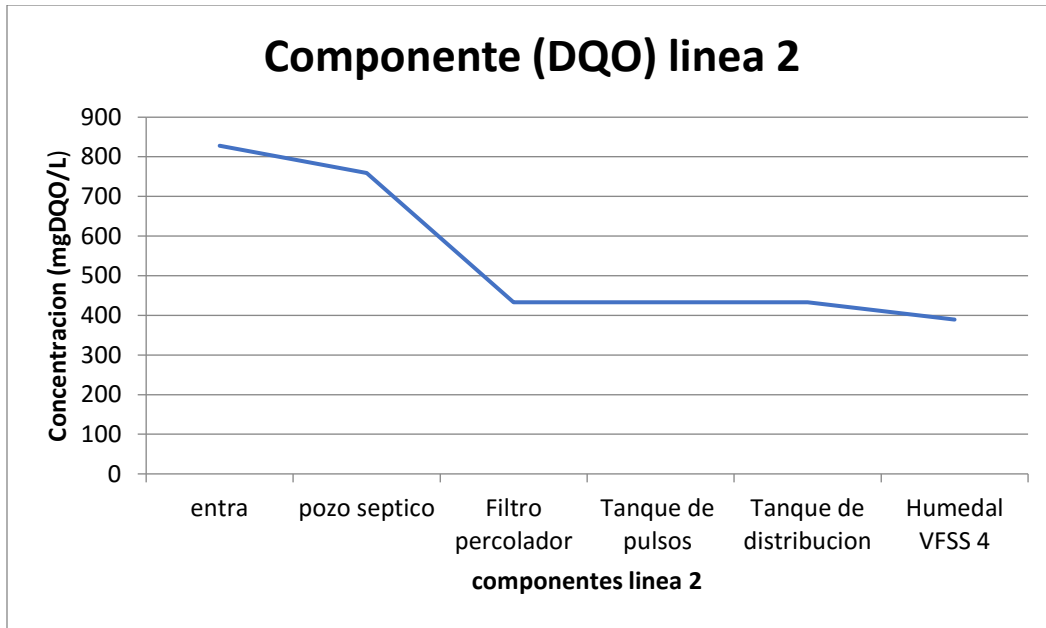
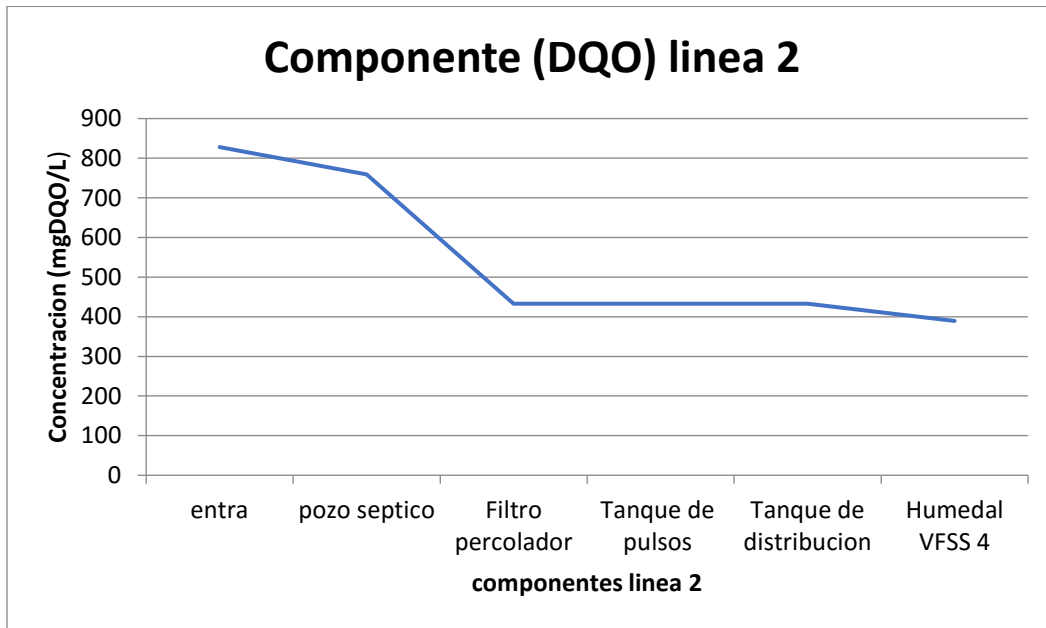


Ilustración 29. Remoción de DBO5 vs sistemas de tratamiento línea 2 (4).



*Ilustración 30.* Remoción de DQO vs sistemas de tratamiento línea 2 (1).



*Ilustración 31.* Remoción de DQO vs sistemas de tratamiento línea 2 (2).

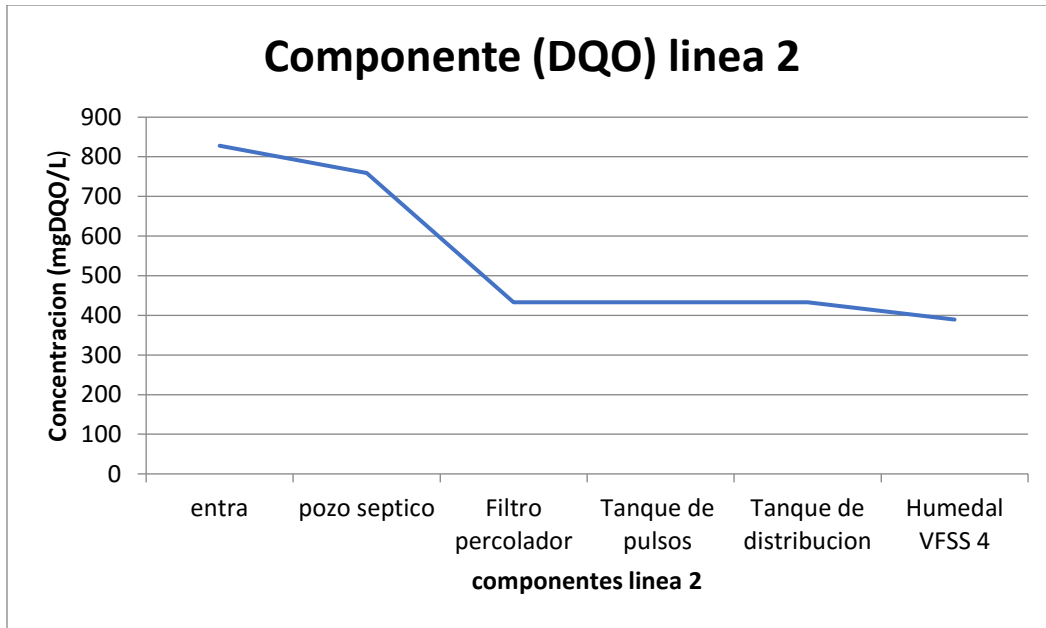


Ilustración 32. Remoción de DQO vs sistemas de tratamiento línea 2 (3).

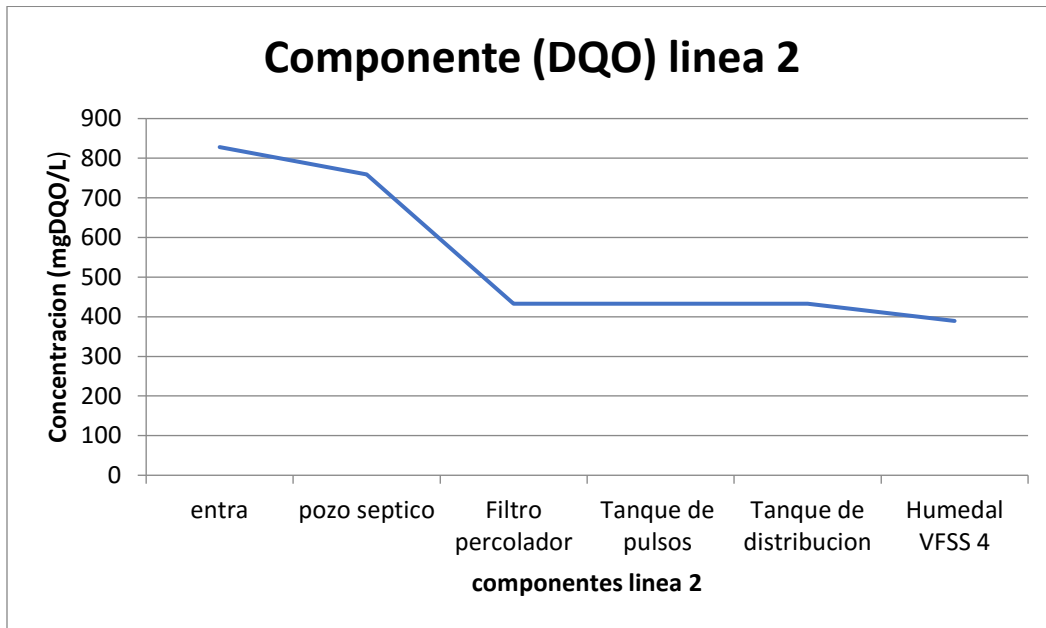
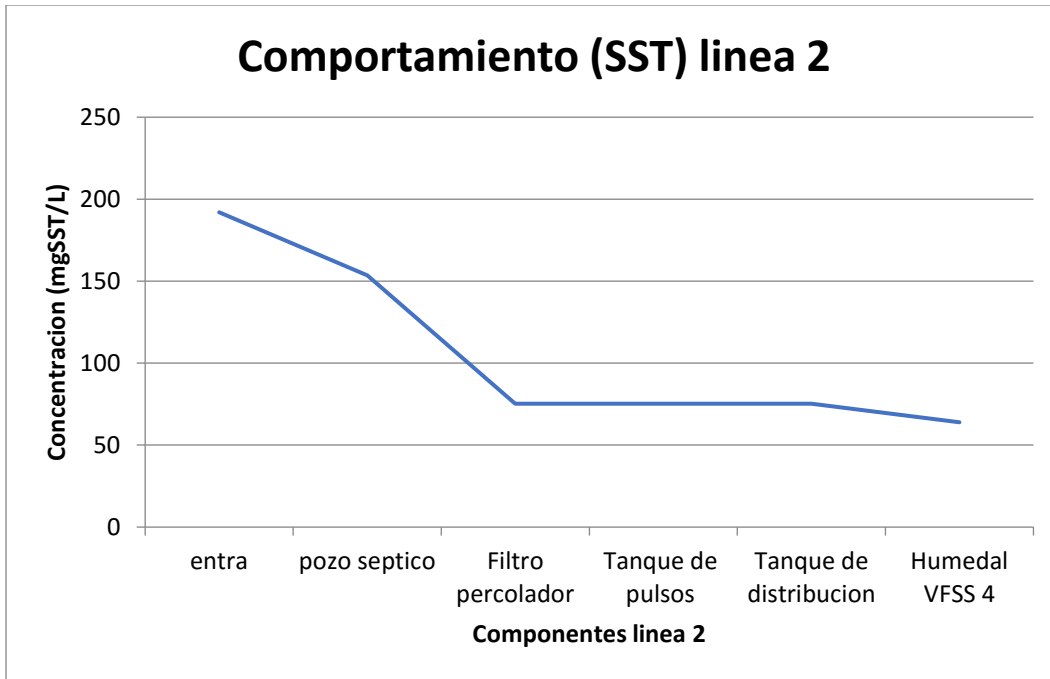
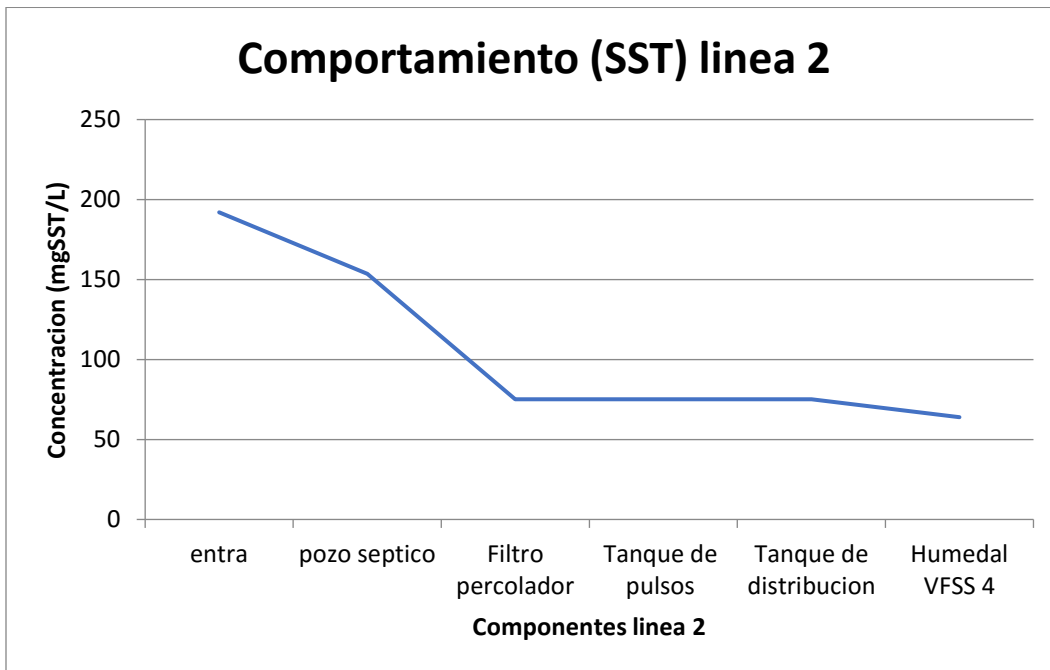


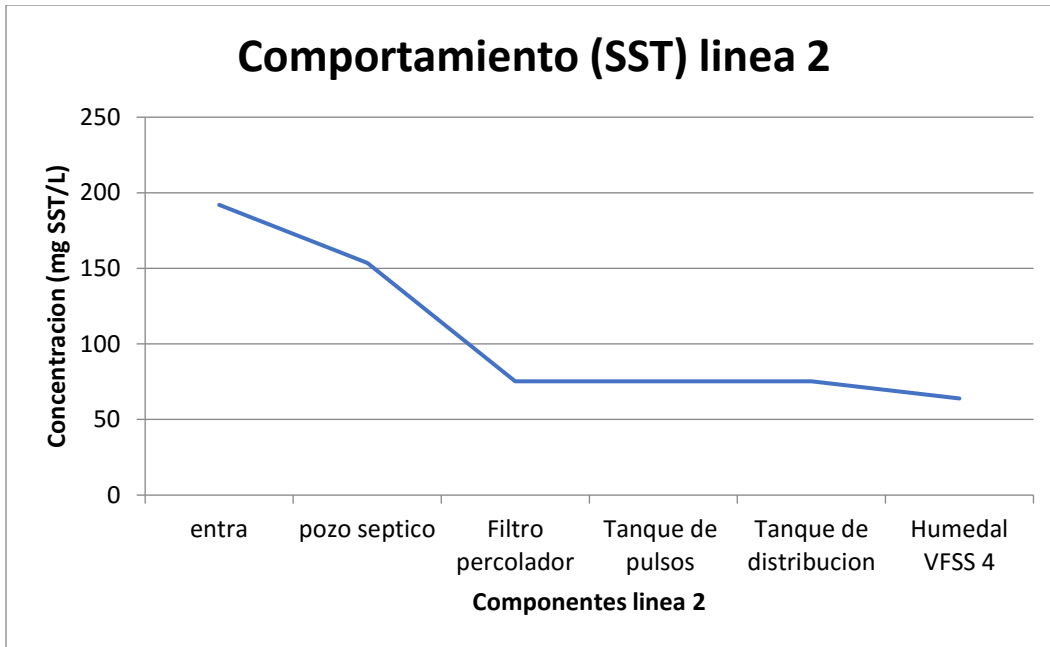
Ilustración 33. Remoción de DQO vs sistemas de tratamiento línea 2 (4).



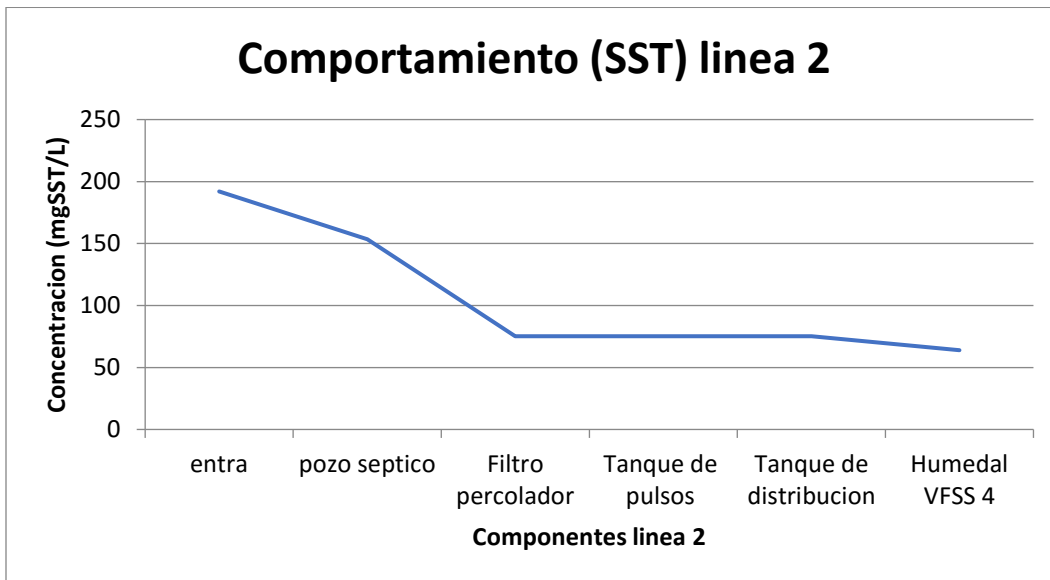
*Ilustración 34.* Remoción de SST vs sistemas de tratamiento línea 2 (1).



*Ilustración 35.* Remoción de SST vs sistema de tratamiento línea 2 (2).



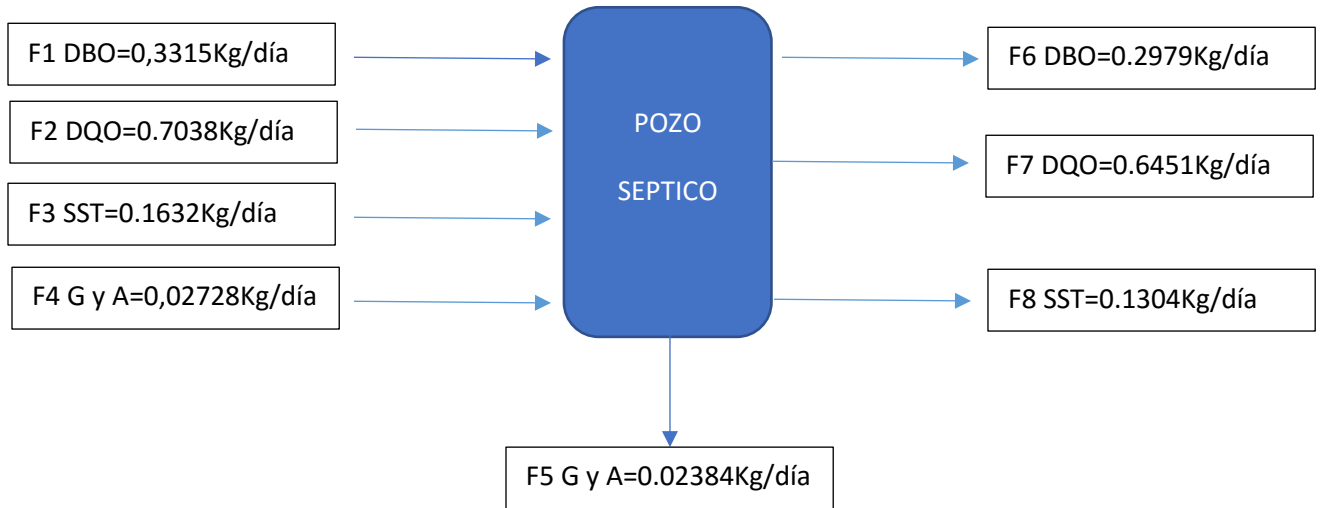
*Ilustración 36.* Remoción de SST vs sistema de tratamiento línea 2 (3).



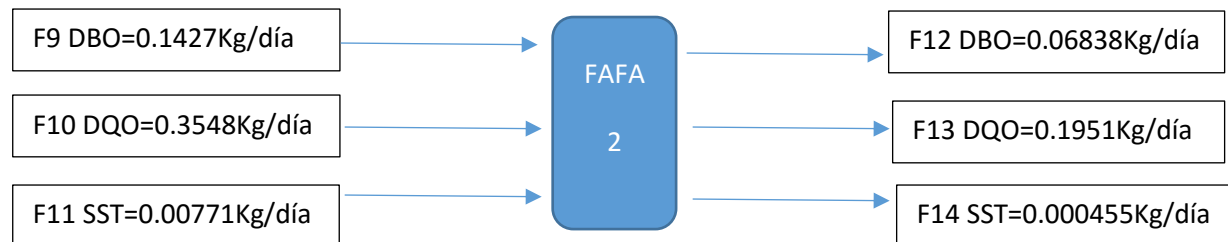
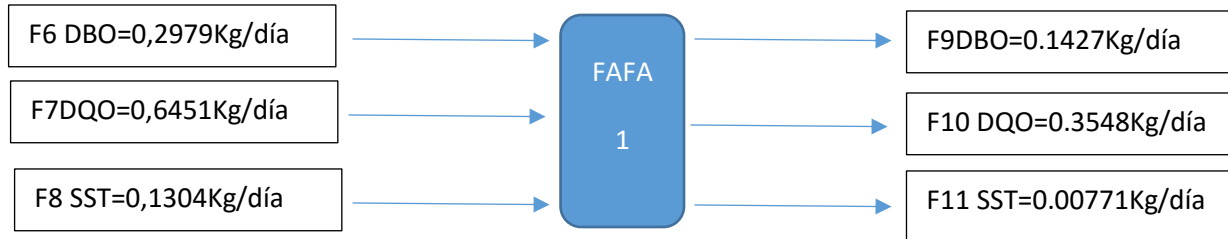
*Ilustración 37.* Remoción de SST vs sistemas de tratamiento línea 2 (4).

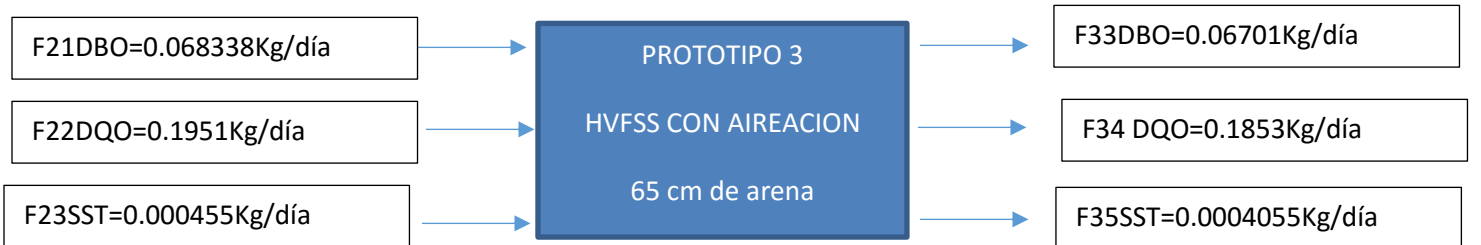
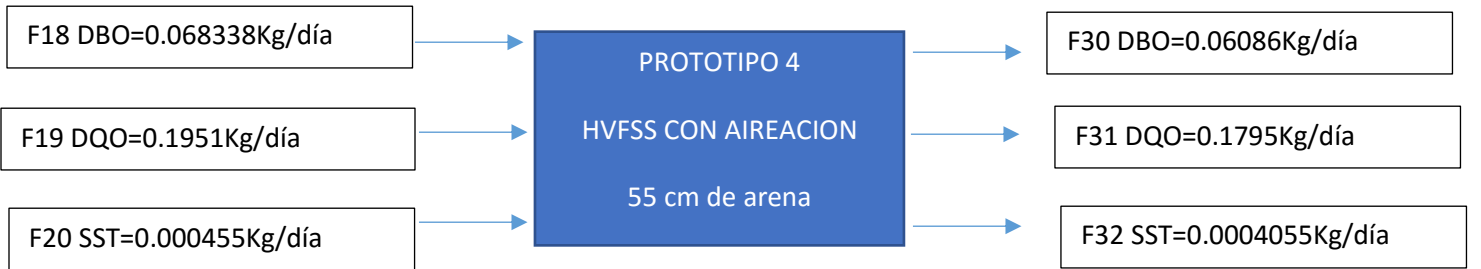
Fuente: las anteriores graficas fueron extraídas del Excel interactivo presentado como anexo

**6.3 Diagramas individuales con los flujos de materia, para afluente y efluente de cada prototipo.**

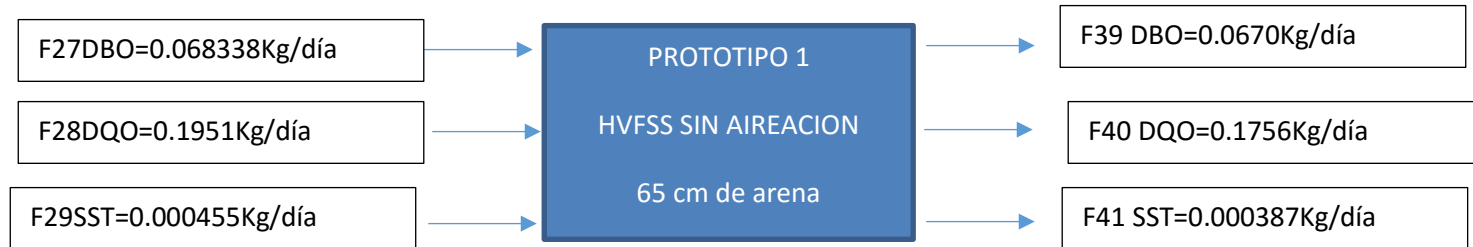
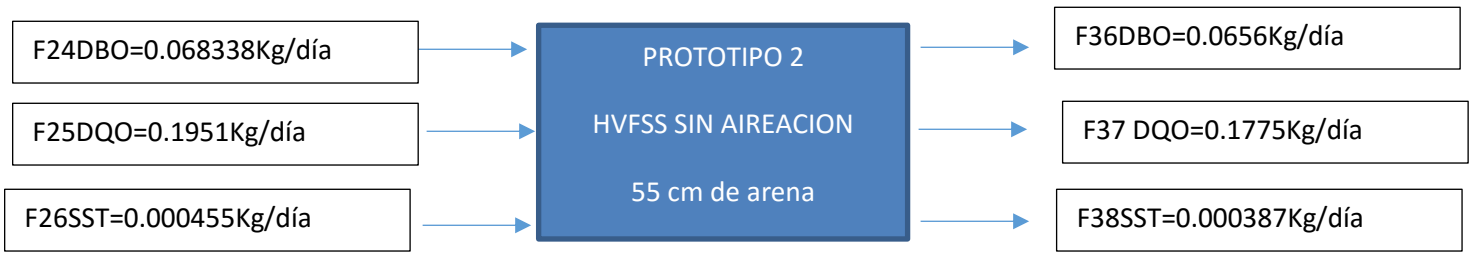


**Línea de Fafas (Línea 1)**

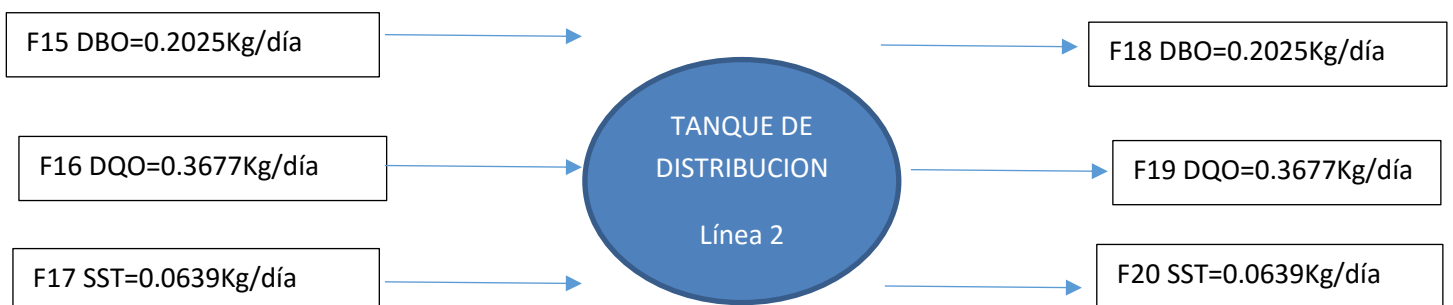


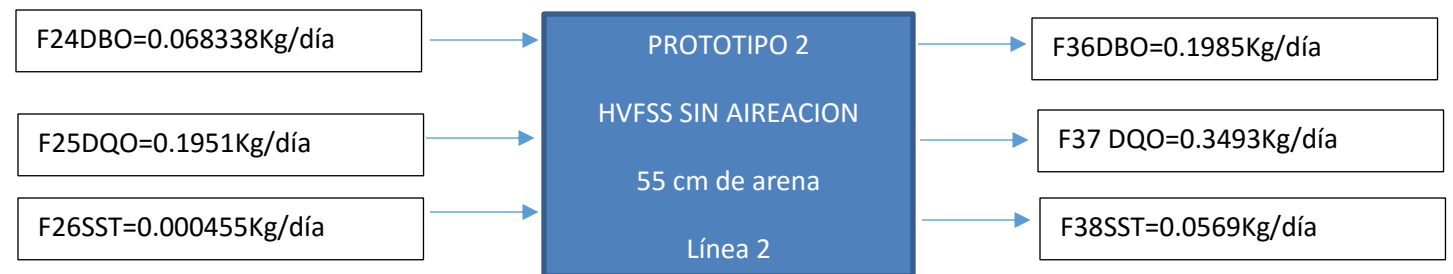
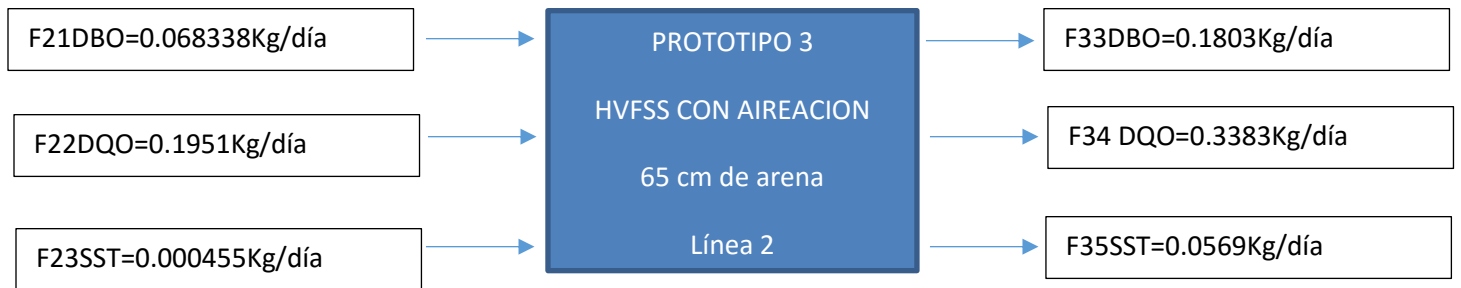
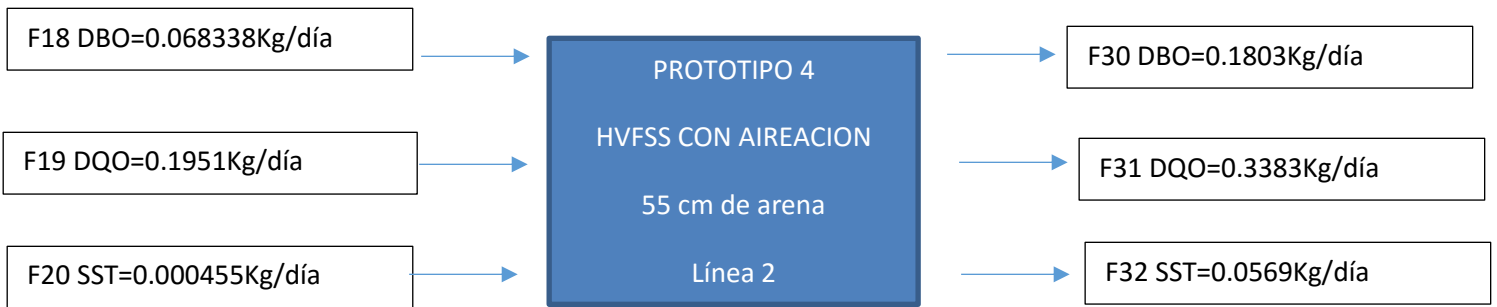






**Línea de filtro percolador (línea 2)**





Norma	Parametros	Norma mg/L	Reportados en el informe de la CHEC (STARD)(mg/L)	Teóricos (línea 1) después del tratamiento (mg/L)				Teóricos (línea 2) después del tratamiento (mg/L)				
				Humedal VFSS1	Humedal VFSS2	Humedal VFSS3	Humedal VFSS4	Humedal VFSS1	Humedal VFSS2	Humedal VFSS3	Humedal VFSS4	
Cap V	pH	6,00 a 9,00	6.72									
fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles (Art. 8)	DQO	200	200	211.2297	218.117625	208.933725	206.63775	398.0196	410.9985	393.6933	389.367	
	DBO5	NR	31.9	71.6028602	78.84359887	77.23454583	78.84359887	212.1226	233.5732	228.8064	233.5732	
	SST	100	148	0.477170238	0.477170238	0.455724385	0.455724385	66.94135	66.94135	63.93275	63.93275	
	GyA	20	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	

Ilustración 38. Comparación de los resultados frente a la resolución 0631 de 2015.

#### 6.4 Balance de energía para el sistema de bombeo.

La bomba estará transportando agua residual cuya densidad es 997,62 kg/m<sup>3</sup> a razón de 85 litros/día. La bomba de succión es un tubo de 2 cm de diámetro interior de la manguera y la descarga es una tubería de 1 cm de diámetro interior. La presión volumétrica en la succión es de 1 kg/cm<sup>2</sup> y en la descarga de 6 kg/cm<sup>2</sup>. Suponiendo que se da un proceso adiabático en el que la succión y la descarga esta al mismo nivel ya que el valor de la diferencia es despreciable, no hay cambio de temperatura, el agua residual es incompresible y la eficiencia de la bomba es de 40%

- a) El trabajo mecánico suministrado al agua residual.
- b) La potencia suministrada al agua residual.
- c) La potencia de la bomba en HP.

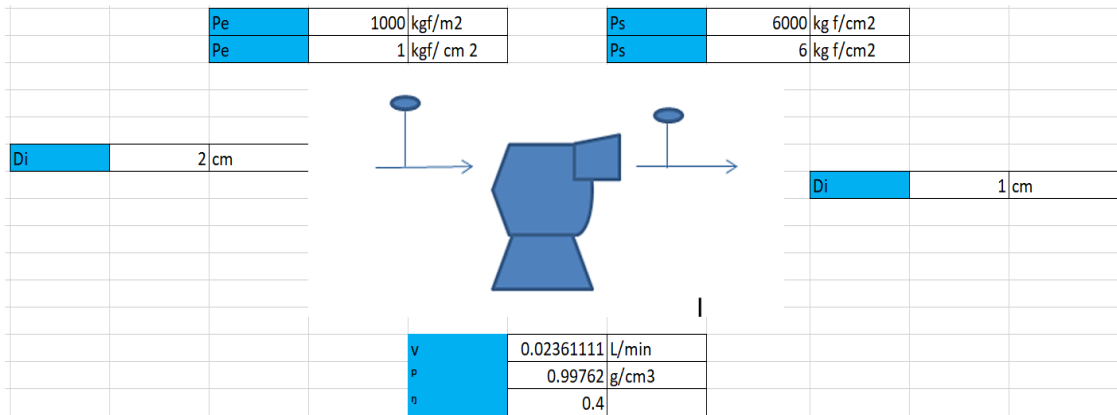


Ilustración 39. Diagrama cuantitativo del sistema de bombeo.

Tabla 24. Factores de conversión del balance de energía.

Factores de conversión			
0.02361111	L/min	23.6111111	cm3/min
23.5549167	g/min	0.00039258	kg/s
0.99762	g/cm3	0.00099762	kg/m3
1	kgf*m/s	0.01315	Hp

Tabla 25. Resultados de los balances de energía.

Resultados de los balances			
flujo másico	23.5549167	g/min	
A1	3.14159265	cm2	0.00031416 m2
A2	0.78539816	cm2	7.854E-05 m2
Ve	1252.60835	m/s	
Vs	5010.43339	m/s	
gc	9.81	kg*m/kgf*s2	
V	1002.38568	m3/kg	
W	-6211490.83	kgfm/kg	
Potencia	-2438.51915	kgfm/s	
Potencia	-32.0665268	Hp	
rendimiento del 100%	-80.166317		

Fuente: Excel interactivo presentado como anexo

## 7 DISCUSION

El principal aporte del estudio consiste en el reconocimiento y aplicación de los conceptos hidráulicos dentro del diseño de los prototipos de humedales artificiales verticales de flujo subsuperficial, filtro anaerobio de flujo ascendente y filtro percolador, además de la formulación de balances de masa aplicados a las aguas residuales domésticas específicamente en los parámetros de DBO5, DQO y SST.

Examinando los resultados obtenidos en la investigación de acuerdo al marco referencial como lo son los lineamientos de diseño de estructura y operación, los límites recomendados para las cargas hidráulicas y orgánicas, resultando aceptable el diseño propuesto en ambas líneas de tratamiento tanto para el pre tratamiento con los filtros anaerobios como con el uso del filtro percolador y su respectivo sedimentador, comprobado por los valores obtenidos en el cálculo de la carga hidráulica lo cual asegura el tiempo óptimo de contacto de las aguas residuales con la biopelícula, lo que a su vez se traduce en la disminución de la carga orgánica presente en las aguas residuales.

Es importante contar con una capa extensa de material poroso donde se pueda formar la biopelícula, en este sentido el prototipo que posee una capa de 65cm de arena posee el mayor porcentaje de remoción según los balances realizados en este estudio, destacándose el humedal artificial numero 4 por tener las concentraciones más bajas de los parámetros anteriormente mencionados a pesar de que no posee tubería de aireación lo cual según la literatura facilita el crecimiento de los microorganismos y por lo tanto intensifica la remoción de materia orgánica, en este caso el espacio sobrante es ocupado por material poroso lo que explicaría un mejor resultado.

Debe tenerse un pre tratamiento antes de que el agua residual llegue a los prototipos de humedal, porque existe el riesgo de que la materia orgánica obstruya los poros por donde percolara el agua residual, debilitando el proceso biológico de degradación lo cual influye en el cumplimiento de la normativa legal vigente de vertimientos a cuerpos de agua resolución 0631 de 2015. Por este motivo son indispensables los prototipos de filtros anaerobios y filtro percolador porque disminuyen la carga orgánica y preparan el agua residual para el tratamiento final, en este caso fue provechoso el uso de los 2 filtros anaerobios de flujo ascendente ya que disminuyen la concentración en mejor instancia que el filtro percolador.

Fue más preciso el uso de los dos filtros anaerobios aunque en comparación sean más altos los porcentajes de remoción en cada parámetro para el filtro percolador con sedimentador, ambos cumplen con la carga hidráulica lo que significa que el material filtrante estará constantemente en contacto con el agua residual, pero era de esperar que el tratamiento de la línea 1 impactara en mayor medida la materia orgánica ya que la superficie de ambas unidades promueve un numero de colonias más amplio que el presente en el filtro percolador.

El estudio implica el uso de las ecuaciones de balances ideales, con la razonable operación de la suma de cargas orgánicas, lo que posibilita el cálculo de las concentraciones de los parámetros de DBO5, DQO y SST teóricamente por la ley de la conservación de la materia. Se reconoce la necesidad de experimentar para corroborar la información suministrada por los balances.

## **8 CONCLUSIONES**

Se deduce en un principio que la facilidad para obtener oxígeno y el espacio suministrado más extenso ayuda a los microorganismos a degradar más la materia orgánica presente en el agua

residual, pero el área superficial de los prototipos es diminuta en comparación con otros humedales artificiales que cumplen esta relación por lo tanto es mayor el impacto del espacio que la inclusión del oxígeno.

Es posible realizar el tratamiento de las aguas residuales por medio de un humedal artificial de flujo subsuperficial vertical, siempre que anteceda un tratamiento preliminar que disminuya la carga orgánica presente, para evitar el riesgo de obstrucción, este tratamiento preliminar comúnmente consiste de un cribado para eliminar los residuos más grandes y de fácil disposición, el uso de trampa grasas y pozo séptico fue de gran ayuda en esta investigación ya poseen un porcentaje de remoción alto para grasas y aceites mostrando una baja concentración (<28mg/L) en la salida del pozo séptico.

La línea 1 de tratamiento dispone las aguas residuales con una menor carga orgánica que la línea 2 de tratamiento, esto se debe en mayor parte al trabajo que realizan los microorganismos presentes en los filtros anaerobios de flujo ascendente, que aunque teóricamente posean porcentajes de remoción más bajos que el filtro percolador el agua filtrada por los fajas pasa por un tratamiento doble y continuo que numéricamente baja la DBO5 de 350.5mg/L a 80.45mg/L en este sector del tren de tratamiento.

Los sólidos suspendidos totales son teóricamente mayormente removidos de las aguas residuales tanto en la línea 1 y 2 de tratamiento, lo que se evidenciaría en el efluente final del proceso con aguas más claras. Aportando a la disminución de los impactos por exceso de nutrientes, consumo de oxígeno disuelto y transporte de materiales fecales en el río Campo alegre que recibe las aguas residuales de la central hidroeléctrica en la Insula.

Las cargas orgánicas que son vertidas al río Campo alegre no solo están dentro de los límites permisibles por la autoridad ambiental Colombiana, sino que disminuyen en gran medida la presencia desmedida de nutrientes como fósforo y nitrógeno, estos son los principales causantes del fenómeno de eutrofización en las aguas ya que alteran las características del medio ambiente acuático empezando por regular el proceso de la fotosíntesis, lo que implica una disminución en el crecimiento de los productores como algas, plantas marinas y otros organismos que son capaces de producir su propio alimento, pero que son el alimento de otras especies y de esta manera se afecta la cadena trófica que en pocas palabras aumentara la entropía conocida mayormente como el desorden del ecosistema.

Los diseños propuestos fueron aceptables ante los límites recomendados por otros autores al estar dentro de los valores óptimos, lo que indica que la construcción del tren de tratamiento estará restringida solamente por el espacio disponible.

La resolución 0631 de 2015 dicta los límites máximos permisibles para los vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales, el artículo 8 dicta las aguas residuales domésticas (ARD) de las soluciones individuales de saneamiento de viviendas unifamiliares o bifamiliares que se deben cumplir, en este sentido el tren de tratamiento propuesto para el caudal de 850 (L/día) cumple con los estándares de esta norma que en DBO5 no posee valor límite aunque se entrega en una concentración baja de 78 (mg/L), la DQO ha sido reducida hasta 206 (mg/L) siendo el límite 200 (mg/L) ya que la diferencia es poca es recomendable monitorear periódicamente el efluente, los SST se encuentran a una concentración < de 0.5mg/L mientras que la resolución exige 100mg/L de este parámetro. Cumpliendo uno de los



principales objetivos de esta investigación diseñar prototipos para la remoción de la materia orgánica.

## 9 Anexos

### Procedimientos y métodos para caracterización fisicoquímica de agua residual domestica

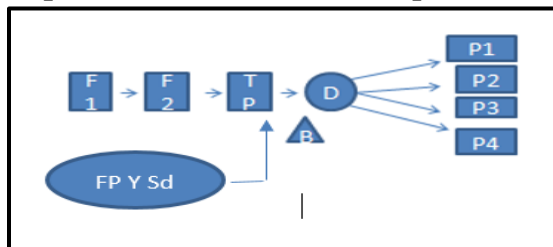


Ilustración 40. Esquema básico para toma de muestras.

#### Actividades del muestreo:

- Medición de caudal en afluente y en efluente de los prototipos.

Los caudales de los prototipos se mediran con los siguientes instrumentos:



Ilustración 41. Cronometro.

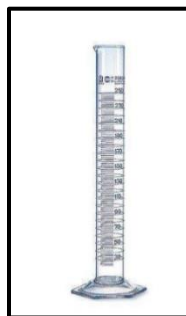


Ilustración 42. Probeta.

Probetas para medir el volumen y cronometro para medir el tiempo, se toma una muestra del flujo a la entrada y salida de cada prototipo y de esta manera se calcula el caudal.

- Medición de la frecuencia de pulsos

La bomba de presión que se requiere para trasladar el agua residual del FAFA 2 Y el Filtro percolador y sedimentador es una bomba de tipo rotatorio que se caracteriza por atrapar un líquido y moverlo hasta el punto de descarga, Estas bombas desplazan una cantidad de líquido definido por cada golpe de revolución de la máquina que la mueve. Por lo tanto, la potencia, el diseño y las condiciones de succión influirán en la cantidad de líquido que pueden trasladar, teniendo en cuenta lo anterior podemos decir que nuestra bomba tendría una potencia de  $\frac{1}{2}$  HP, obteniendo como resultado una frecuencia de pulsos de 10pulsos/día.

- Medición de pH y temperatura in situ

Usando los instrumentos de medicion como el pHmetro el cual entre otras capacidades esta la medicion de temperatura y considerando que estos parametros no deberian de ser medidos despues de una refrigeracion como lo dice la siguiente tabla:

Tabla 26. *Requerimientos especiales.*

DETERMINACIÓN	ENVASE	TAMAÑO MÍNIMO MUESTRA (mL)	CONSERVACIÓN	TIEMPO MÁXIMO DE CONSERVACIÓN recomendado/obligado
Acidez	P, V (B)	100	Refrigerar	24h / 14d
Alcalinidad	P, V	200	Refrigerar	24h / 14d
DBO	P, V	1000	Refrigerar	6h / 48h
Ganuro: Total	P, V	500	Añadir NaOH hasta pH >12, Refrigerar en oscuridad	24h /14d;24h si hay sulfuros
Cloro residual	P, V	500	Analizar inmediatamente	0,5h / Inmediato
Color	P, V	500	Refrigerar	48h / 48h
Conductividad	P, V	500	Refrigerar	28d / 28d
Dióxido de Carbono	P, V	100	Analizar inmediatamente	Inmediato /N.C.
Dureza.	P, V	100	Añadir HNO <sub>3</sub> hasta pH <2	6 meses / 6 meses
Fluoruro	P	300	Ninguno	28d / 28d
Fosfato	V(A)	100	Para fosfato disuelto. filtrar inmediatamente; Refrigerar	48 h / N.C.
Metales, en general	P(A),V(A)	—	Para disueltos, filtrar inmediatamente, añadir HNO <sub>3</sub> hasta pH<2	6 meses / 6 meses
Nitrato	P, V	100	Analizar lo antes posible, o refrigerar	48h/48h(28d para muestras cloradas
Nitrato + nitrito	P, V	200	Añadir H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH <2. Refrigerar	Ninguno /28d
Nitrito	P, V	100	Analizar lo antes posible o refrigerar	Ninguno / 28d
Nitrógeno: Amoniac	P, V	500	Analizar lo antes posible o añadir H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH <2, refrigerar	7d / 28d
Olor	V	500	Analizar lo antes posible, refrigerar	6h / N.C.
Orgánico, Kjeldahl	P, V	500	Refrigerar, agregar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH <2	7d / 28d
Winkler			Puede retrasarse la titulación tras la acidificación	8h / 8h
Sílice	P	200	Refrigerar, no congelar	28d / 28d
Sólidos	P, V	200	Refrigerar	
Sulfato	P, V	100	Refrigerar	28d / 28d
Turbidez	P, V	100	Analizar el mismo día, guardar en la oscuridad hasta 24h, refrigerar	24h / 48h
pH	P, V	50	Analizar inmediatamente	24h / inmediato

Fuente: métodos analíticos para la evaluación de la calidad fisicoquímica del agua. (2010)

- Toma de muestra flujo de entrada y el flujo de salida de los prototipos, toma de fotos.



Ilustración 43. Canal de rebose, afluente STARD (punto 1).



*Ilustración 44.* Cámara de salida punto de aforo efluente STARD (punto 3).

Fotografías tomadas por la universidad tecnológica de Pereira, informe de caracterización de vertimientos líquidos

- Registro de datos, etiquetación de muestras



Para la registración de datos de las muestras in situ se debe disponer de un cuaderno de campo el cual contenga una ficha en la que se relacionan los datos y circunstancias necesarios para su identificación inequívoca y que permita una mejor interpretación de los resultados obtenidos. Dicha ficha se rellenará en el momento de la toma de muestra, formará parte de un cuaderno, y contendrá obligatoriamente los siguientes datos:

- ✓ Número de muestra.
- ✓ Nombre de quien ha hecho la toma.
- ✓ Fecha y hora de toma
- ✓ Identificación del punto de muestreo
- ✓ Adiciones (acidificación, conservantes, etc.).
- ✓ Situación del punto de muestreo.
- ✓ Método de toma.

- ✓ Tiempo de bombeo.
- ✓ Profundidad de muestreo.
- ✓ Volumen de muestra recogido.
- ✓ Parámetros determinados en campo. (T', pH, etc.).

Además, incluirá un apartado de observaciones en el que se anotará cualquier incidencia que pueda influir sobre el análisis o su interpretación, como por ejemplo: Presencia de turbidez o desprendimiento de gases, Olores o colores anormales o extraños, Presencia de actividades potencialmente contaminantes en los alrededores del punto de control, Uso que se hace del agua. La etiquetación de muestras es muy útil para evitar cualquier tipo de confusión o errores de identificación, los datos que se deben incluir en esta etiqueta son:

- ✓ Número de muestra.
- ✓ Nombre de quien ha hecho la toma.
- ✓ Fecha y hora de toma.
- ✓ Identificación del punto de muestreo.
- ✓ Tratamiento (acidificación, conservantes, etc....).

 Instituto Tecnológico GeoMinero de España	<b>MUESTRA DE AGUA PARA ANÁLISIS</b>	
Número de muestra:	Fecha:	Hora:
Punto de muestreo:		
Tratamiento:		
Operador:		
Observaciones:		 Ministerio de Medio Ambiente

*Ilustración 45.* Ejemplo de etiqueta autoadhesiva para muestreos en botellas.

Información recuperada de la página:

[http://aguas.igme.es/igme/publica/libro30/pdf/lib30/6\\_eti.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/libro30/pdf/lib30/6_eti.pdf)

- Almacenamiento de muestras en neveras portátiles

<b>Determinación</b>	<b>Tamaño mínimo de la muestra (ml)</b>	<b>Conservación</b>	<b>Tiempo máximo de conservación (recomendado/obligado)</b>
DBO	1000	Refrigerar	6h - 48 h
DQO	100	Analizar tan pronto sea posible, o adicionar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a pH < 2.0, refrigerar	7 Días -28 Días
SOLIDOS	200	Refrigerar	2 - 7 Días
PH	50	Analizar inmediatamente	24h - Inmediato
Grasas y Aceites	1000	Adicionar HCl ó H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a pH < 2.0, refrigerar	28 Días

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 19 ed., New York, 1995

Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes. United States Environmental Protection Agency. Cincinnati, 1983.

## 10 BIBLIOGRAFÍA

Nivala, J., Knowles, P., Dotro, G., García, J., Wallace, S, (2012). Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Water Research, 1625-1640.

Saeeda, T., y Sunc, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. Journal of Environmental Management, Pages 429–448.

Yan, Y., y Xu, J. (2014). Improving winter performance of constructed wetlands for wastewater treatment in Northern China: a review. Wetlands, 34, pp. 243–253.

Lara, S.R., y Mazzoco, R.R. (2009). effect of hydraulic and organic loads on the mass removal of a structured packing in a trickling filter. revista mexicana de ingeniería química, 101-109.

Kadleck. Wallace. (2008). Eficiencias de remoción en los humedales artificiales.

Brix. Arias. (2005). Sistemas para el control de aguas residuales.

Langergraber y Haberl. (2012). Eficiencias en los humedales construidos con arena y grava.

Brix. y Kolb. (1998). biodegradación aeróbica y anaeróbica

Villegas, E. (2006). Remoción media porcentual con intervalo de confianza del 95%.

Gutiérrez. (2010). Parámetros del agua, comportamiento de la DBO, DQO y SST

Beltrán. (2006). Porcentaje de remoción de DBO Y DQO en trampa grasas.

Lara. (1999). Actividad biológica y sustancias contaminantes en el agua.

Alvarado. (2011). Remoción filtros anaerobios de flujo ascendente P. 13

Mena, J. (2008). Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: ventajas de los sistemas híbridos. Alquimia Soluciones Ambientales.

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 1998. “El medio ambiente en Colombia” – capítulo 4: El Agua. OP Gráficas S.A., Bogotá. Jerez, E. (2007). El cultivo de las heliconias. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas Cuba. Cultivos Tropicales 28 (1), 29-35.

Ministerio de agricultura y desarrollo rural, 2011. Proyecto: desarrollo de capacidades en el uso seguro de aguas residuales para agricultura. Bogotá, Colombia.

Tchobanoglous, G., Burton, Franklin L, Stensel, H. D., y Metcalf & Eddy. (2003). Wastewater engineering: treatment and reuse. Boston: McGraw-Hill.

García, J., y Corzo, Angélica. (2008). Depuración con humedales construidos: Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. Universidad Politécnica de Catalunya.

Brix, H., y Arias, C. A. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 13, 17–24.

Metcalf; Eddy. (1995). Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización, 706 - 1505