



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

*EMPLEO DE LA TECNOLOGÍA DE REACTORES
BIOLÓGICOS CON MEMBRANAS PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
MUNICIPALES*



TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

PABLO DANIEL ROBERTO DACOMBA TORRES

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, DF.

2013



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/119/13

Señor
PABLO DANIEL ROBERTO DACOMBA TORRES
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"EMPLEO DE LA TECNOLOGÍA DE REACTORES BIOLÓGICOS CON MEMBRANAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES"

- INTRODUCCIÓN
- I. REACTORES BIOLÓGICOS CON MEMBRANAS
 - II. PROYECTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CAULEY CREEK, DULUTH, GEORGIA, ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA
 - III. PROYECTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CIUDAD UNIVERSITARIA, D.F. MÉXICO
 - IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS
 - V. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 11 de septiembre del 2013.
EL PRESIDENTE

M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH*gar.



RESUMEN

Los recursos hidráulicos en las ciudades están siendo cada vez más escasos debido a factores como el incremento de la población o la contaminación, a grandes rasgos, la problemática consiste en que existe un déficit en la oferta de agua potable en una creciente demanda. Debido a que alternativas como encontrar otras fuentes de abastecimiento de agua potable se van agotando, una solución viable consiste en la reutilización de agua tratada. La parte interesante de la reutilización es encontrar un sistema de tratamiento que produzca agua con la calidad necesaria y el menor costo posible. En el presente trabajo analizamos y describimos a fondo la tecnología de los reactores biológicos con membranas, una alternativa con un potencial prometedor para el tratamiento de aguas residuales. También se analizaron parámetros de calidad del agua para comparar la eficiencia de remoción de diferentes sistemas de tratamiento que estaban en uso previo a la instalación del sistema de reactores biológicos con membranas, entre los cuales se encuentran lodos activados, discos biológicos rotatorios y filtro percolador. El resultado obtenido fue básicamente que el sistema de reactores biológicos con membranas es más eficiente en cuanto a remoción que el de los otros sistemas. Es importante mencionar que los resultados y descripción de procesos son de dos proyectos particulares, el proyecto de la planta de tratamiento de aguas residuales de Cauley Creek ubicada en Duluth, Georgia y el proyecto de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria ubicada en México, Distrito Federal.



AGRADECIMIENTOS

Quisiera destinar estas líneas para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su constante ayuda y apoyo hicieron posible la realización del presente trabajo, en especial al Dr. Enrique César Valdez, director de esta investigación, por su amabilidad y orientación, pero sobre todo por la motivación proporcionada a lo largo de este trabajo.

Un agradecimiento muy especial a mis padres, hermanos y a toda mi familia por todo su apoyo a través de esta largo trayecto. Por estar ahí siempre que los necesito, por su comprensión, ánimos y paciencia, muchas gracias.

Quisiera hacer extensiva mi gratitud para el CP Alfredo Harp Helú y su fundación, que en conjunto con Fundación UNAM y la DGEI hicieron posible mi participación en el programa de movilidad estudiantil, dándome una inolvidable experiencia personal y académica la cual fue causa de la elección del tema de este trabajo.

La Universidad Nacional Autónoma de México también es merecedora de un extraordinario agradecimiento por brindarme una gran parte de mi educación con la cual podré enfrentar los diversos retos profesionales que se me presenten en la vida. También quiero dar gracias a mis profesores, parte fundamental de mi preparación y a los ingenieros John Koon y Juan Hilario García Gil por su colaboración en el suministro de datos necesarios para la realización de una parte fundamental de esta investigación.

“Life moves pretty fast. If you don't stop and look around once in a while, you could miss it.”

--- Ferris Bueller ---



Índice

INTRODUCCIÓN.....	5
CAPÍTULO 1 – REACTORES BIOLÓGICOS CON MEMBRANA.....	8
1.1 Configuraciones de los sistemas BRM	8
1.2 Configuraciones de membranas en los sistemas BRM	11
1.3 Tipos de membranas y características.....	16
1.4 Fundamentos de la filtración con membranas	20
1.5 Comparación entre sistemas BRM y sistemas de lodos activados convencionales (LAC)	22
CAPÍTULO 2 – PROYECTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE CAULEY CREEK, DULUTH, GEORGIA, ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA	25
2.1 Planeación de la planta de tratamiento de Cauley Creek.....	25
2.2 Diseño de la planta de tratamiento de Cauley Creek	35
2.3 Construcción de la planta de tratamiento de Cauley Creek	51
2.4 Operación de la planta de tratamiento de Cauley Creek.....	54
CAPÍTULO 3 – PROYECTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CIUDAD UNIVERSITARIA, DF MÉXICO	59
3.1 Planeación de la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria	59
3.2 Diseño de la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria	66
3.3 Construcción de la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria	76
3.4 Operación de la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria.....	79
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	82
4.1. Parámetros de calidad del agua empleados	82
4.2. Resultados de calidad del agua de la planta de Cauley Creek.....	82
4.3. Resultados de calidad del agua de la planta de CU	86
4.4. Análisis de resultados de calidad del agua.....	103
CAPÍTULO 5 – CONCLUSIONES.....	108
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	110

INTRODUCCIÓN

No es ninguna novedad que en México y en diversas partes del mundo, el agua, uno de los recursos naturales indispensables para la vida, es cada vez más escasa. El incremento de la población ocasionará la disminución de la disponibilidad del agua a nivel nacional, pasando de 4230 [m³/hab/año] en el 2010 a 3800 [m³/hab/año] en el 2030 (Figura 1) (Comisión Nacional del Agua, 2011, pp. 110-112).

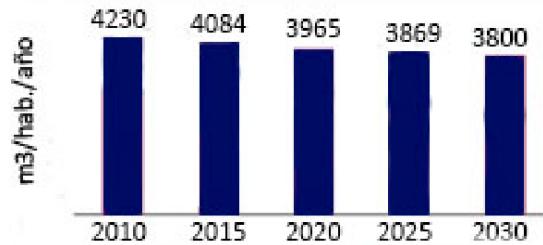


Figura 1 – Proyecciones del agua renovable per cápita en México. (Comisión Nacional del Agua, 2011)



Figura 2 – Agua renovable per cápita, 2030. (Comisión Nacional del Agua, 2011)

Asimismo, se espera que el agua renovable per cápita alcance niveles cercanos o inferiores a 1000 [m³/hab/año] lo que se clasifica como un nivel de escasez grave (Figura 2).

La desigual distribución del agua potable y su baja disponibilidad debido a la contaminación de diversas fuentes de abastecimiento han conducido a que exista un déficit en la oferta ante una creciente demanda de agua potable. A causa de la falta de agua, los gobiernos se ven en la necesidad de encontrar otras fuentes y soluciones al problema de escasez y, al agotarse las alternativas para proporcionar agua a la sociedad, la solución más viable es el reúso del agua tratada.

El potencial para reusar el agua es muy grande, ya que cada vez más personas emigran a las ciudades mientras que la creciente industria y población demanda más agua potable y son generadoras de aguas residuales. Es muy importante tener en cuenta que para poder tratar las aguas residuales, se requiere entender qué contaminantes contiene, qué problemas pueden ocasionar dichos contaminantes y qué es lo que se necesita para removerlos. Es por eso que poco a poco se fueron construyendo y operando plantas de tratamiento de agua residual en el mundo, ya que después de recibir un tratamiento



adecuado se pueden reusar estas aguas para riego, generación de energía, algunos procesos industriales y para regresarla al medio ambiente y recargar las fuentes naturales. Finalmente, algo que frecuentemente se olvida es que se requiere tratar el agua residual no solamente para reciclarla y resolver el problema de escasez, sino también para preservar el ambiente y, en consecuencia, la salud humana.

Mientras la población de México se va incrementando año con año y cada vez más personas emigran hacia áreas urbanas, en algunos casos los métodos tradicionales de tratamiento de aguas residuales municipales convencionales tienen limitaciones para responder a las condiciones actuales. Entre las principales condiciones limitantes se tienen la disponibilidad de terreno y la actitud negativa por parte de los vecinos para establecer la planta. Estas razones, junto a la innovación y desarrollo tecnológico, han sido los principales factores para el surgimiento de los sistemas de reactores biológicos (biorreactores) con membrana o BRM. Poco a poco, dichos sistemas están desarrollándose y operando en diversas partes del mundo, contribuyendo en la gestión eficiente del tratamiento de aguas residuales y brindándoles a su vez una ventaja competitiva en cuanto a calidad del agua tratada e impacto ambiental.

En las generaciones actuales, con la creciente educación acerca del ambiente y el inevitable impacto de las actividades antrópicas en el planeta, es indispensable buscar, desarrollar e implantar soluciones que disminuyan lo más que se pueda el impacto ambiental para tener un adecuado manejo de nuestros desechos y recursos naturales.

En el presente trabajo se describe y analiza el funcionamiento de la tecnología de reactores biológicos con membranas para el tratamiento de agua residual, que consiste en una alternativa innovadora con la cual podremos eficientemente reutilizar el agua residual, con la ventaja de provocar menor impacto ambiental que los métodos de tratamiento convencionales, entre muchas otras ventajas.

En el primer capítulo, se expone el marco teórico, en donde se explica en qué consiste la tecnología de reactores biológicos con membranas y sus principales diferencias con el tratamiento de lodos activados convencionales, así como las diferentes configuraciones y características de las membranas. En el segundo capítulo, se describe la planta de tratamiento de aguas residuales Cauley Creek, ubicada en Duluth, Georgia, que el autor de la presente tesis visitó como parte del curso Water Quality a mediados de mayo del 2012, al haber solicitado formar parte del programa de movilidad estudiantil, estudiando durante un semestre en la institución Georgia Institute of Technology, ubicada en Atlanta, Georgia. Esta actividad permitió posteriormente entablar comunicación con el profesor de la asignatura, John Koon para la recopilación de mayor información. En el tercer capítulo se analiza el tipo de tecnología BRM instalada en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria D.F., incluyendo una descripción de las diferentes etapas del proyecto. Finalmente, se concluye el trabajo con la exposición y análisis de los resultados de calidad del agua de los dos proyectos mencionados.



Objetivo general

Analizar el funcionamiento de la tecnología de reactores biológicos con membranas y describir su aplicación como proceso biológico en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.

Objetivos particulares

- Describir el proceso de reactores biológicos con membranas.
- Describir las características de las membranas.
- Presentar los aspectos relevantes de las etapas de dos proyectos que emplean reactores biológicos con membranas, en contextos socioeconómicos diferentes: la planta de tratamiento de Cauley Creek, así como la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria, destacando sus diferencias en función de la ubicación geográfica, el uso del agua tratada, la normatividad en la materia, etcétera.
- Comparar la calidad del agua producto de las plantas de tratamiento.

Alcances

Se describirá el proceso de tratamiento de aguas residuales municipales empleando reactores biológicos con membranas.

No se efectúa la revisión del diseño del proceso de cada planta de tratamiento.



CAPÍTULO 1 – REACTORES BIOLÓGICOS CON MEMBRANA

Los reactores biológicos (o biorreactores) con membranas son un tipo de tratamiento biológico en donde microorganismos degradan agentes contaminantes antes de ser filtrados por membranas, ya sean sumergidas o externas al reactor. Dichas membranas son almacenadas en módulos que a su vez se almacenan en cartuchos (cassette) los cuales se ensamblan dentro de un tanque, llamado reactor biológico. Los reactores biológicos con membranas combinan el tratamiento biológico convencional con ultrafiltración por medio de las ya mencionadas membranas, para dotar al proceso de una forma efectiva de remover nutrientes y sólidos suspendidos. El aire forma una parte fundamental, ya que se introduce mediante difusores para evitar ensuciamiento de la membrana durante la filtración y el mismo aire a su vez mezcla el agua residual en el tanque y le provee de oxígeno al proceso biológico. Como resultado se obtiene un efluente de muy alta calidad que excede los requerimientos de las normas oficiales mexicanas aplicables.

Los mayores retos a los que se enfrentan los reactores biológicos de membranas son la productividad, el impacto ambiental, costos de energía y la simplicidad y eficiencia en la operación. En diversos sistemas ya instalados alrededor del mundo, se empieza a demostrar que dichos retos tienen forma de ser satisfechos, por lo que la tecnología se considera cada vez más viable. También es importante mencionar que, aunque actualmente ya se cuenta con datos y experiencias prácticas con los BRMs, aún existe un potencial importante para optimizar el proceso.

En este capítulo, se abordan algunos aspectos fundamentales acerca del proceso de biorreactores con membrana (BRM), así como las diferentes configuraciones de los sistemas, la función de las membranas en el proceso y una comparación breve entre el tratamiento convencional de lodos activados y los BRM.

1.1 Configuraciones de los sistemas BRM

Los sistemas BRM pueden tener dos configuraciones, de acuerdo a la posición de la membrana en el sistema: de membrana integrada (interna) o sumergida, y de membrana externa o con recirculación.

La configuración de biorreactor de membrana integrada consiste en que el elemento que se ocupa de la separación física de los sólidos suspendidos (membrana) está sumergido en el reactor biológico o en un tanque anexo al reactor biológico (cámara de filtración). La forma en que opera esta configuración es que se aplica una succión o presión negativa al permeado (fuerza impulsora) de la membrana para así obtener la ultrafiltración deseada. Se pueden emplear membranas de tipo tubular, de fibras huecas o planas en dicha configuración.

Para darle el mantenimiento adecuado a la membrana y evitar el ensuciamiento, se puede incorporar un sistema de retrolavado, en el que se bombea el permeado a través de la membrana para su limpieza; se requieren difusores y sistemas de aireación adicionales para la reducción del ensuciamiento de las membranas, así como la mezcla y homogenización del contenido del reactor biológico.

Entre las ventajas de la configuración con membrana sumergida externa se puede mencionar el que se tiene una mayor flexibilidad para darle mantenimiento a las membranas, mientras que en una configuración con las membranas sumergidas dentro del mismo tanque biológico, se puede obtener una concentración más alta de la biomasa; además, no se requiere de recirculación y su construcción es mucho más sencilla que la configuración con membranas sumergidas dentro del reactor biológico (Figuras 1.1a, 1.1b).

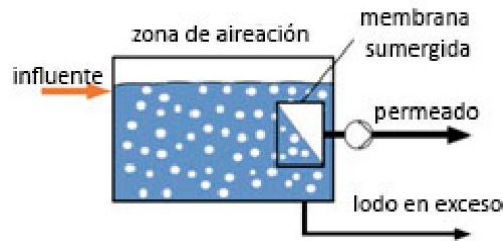


Figura 1.1a – Configuración de BRM con membrana sumergida dentro del reactor biológico. (Kraume, 2007)

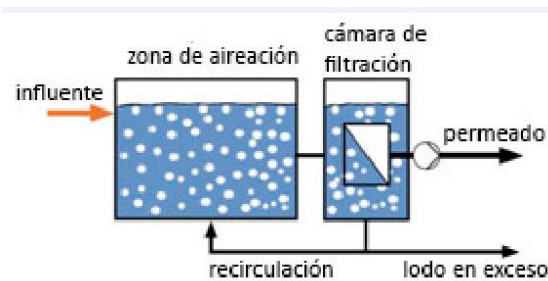


Figura 1.1b – Configuración de BRM con membrana sumergida externa. (Kraume, 2007)

La configuración de un sistema BRM con recirculación (Figura 1.2) es aquella en la que la membrana se encuentra fuera del reactor biológico. Al igual que la configuración de membrana sumergida externa, se caracteriza por recircular la biomasa al reactor biológico. Es de suma importancia para un diseñador saber que en esta configuración, se requiere mucha más energía que en la configuración de membrana integrada debido a la presión de operación para hacer que el fluido pase a través de la membrana con las velocidades que se requieren. Usualmente este tipo de configuración del sistema BRM se emplea para aplicaciones de tratamiento de aguas residuales industriales.

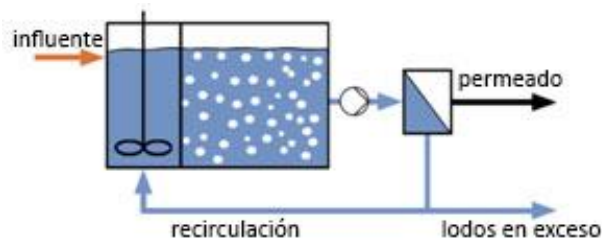




Figura 1.2 – Configuración de BRM con recirculación. (Kraume, 2007)

En la Tabla 1.1 se comparan los dos tipos de configuraciones, incluyendo algunas ventajas y desventajas.

Tabla 1.1 – Comparación entre configuración de membrana interna o externa en los BRM

Características a comparar	BRM de membrana EXTERNA	BRM de membrana INTERNA
Requerimiento de área de membrana	Caracterizada por tener un flux más alto y por consiguiente menores requerimientos de área de membrana	Menor flux pero mayor densidad de empaquetamiento de la membrana (esto es área de la membrana por unidad de volumen)
Espacio requerido	Biorreactores con membranas operando con un flux más alto y con una concentración más alta de sólidos suspendidos volátiles, resultan en sistemas compactos.	Biorreactores con una alta densidad de empaquetamiento y concentración de sólidos suspendidos volátiles de 10 g/L se traduce en un sistema compacto.
Diseño de componentes y dependencia operativa	Biorreactor puede ser diseñado y operado bajo condiciones óptimas incluyendo aquellas para lograr remover nitrógeno y fósforo biológicamente, si se requiere.	Diseño y operación del biorreactor y el compartimento de membranas o el tanque no son independientes. Es necesario tener una recirculación alta en el tanque de membranas para evitar que la concentración de los sólidos suspendidos volátiles aumente.
Consistencia del rendimiento de la membrana	Menos susceptible a cambios en las características de la biomasa y del agua residual.	Más susceptible a cambios de las características en el agua residual y en la biomasa, requiriendo alteración en la estrategia para limpiar las membranas y/o frecuencia de limpiado.
Recuperación del rendimiento de la membrana	Limpieza (fuera de operación) requerida cada 1-2 meses. Procedimiento simple y automatizado que normalmente	Limpieza de recuperación (fuera de operación) requerida cada 2-6 meses. Es un procedimiento más complejo que requiere de



	no requiere más de 4 horas.	más tiempo y actividades manuales (limpiado físico de la membrana) ocasionalmente son requeridas.
Vida de la membrana o requerimientos de reemplazo	Resultados indican que se tiene una vida de operación de 7 años con membranas hechas de polímero previo a ensuciamiento irreversible. Se puede extender la vida de operación empleando materiales cerámicos.	Resultados indican una vida de operación de 5 años, puede ser posible antes del ensuciamiento irreversible y/o daño físico excesivo de la membrana.
Estatus de aplicación a gran escala	Pocos sistemas no convencionales están en operación.	Su aplicación a gran escala se extiende por todo Estados Unidos y algunos otros países.
Economía	Diseños no convencionales se traducen en costos comparables de energía. Se tiene un costo de infraestructura y equipos comparable con tasas bajas de alimentación de agua residual (aproximadamente 1893 [m ³ /día]).	Se tiene una ventaja en los costos de infraestructura y adquisición de equipos. También se tiene una ventaja en costos debidos a la operación si se tienen mayores tasas de alimentación de agua residual.

(WEFTEC-Sutton, 2005)

1.2 Configuraciones de membranas en los sistemas BRM

En los sistemas BRM, las membranas son el corazón del proceso ya que, además de estar sumergidas en el reactor biológico, son la principal barrera para remover la biomasa. Usualmente, el diámetro del poro está en el ámbito de 0.035 a 0.04 micras, dependiendo del proveedor, para remover eficientemente los sólidos suspendidos y la biomasa. El nivel de filtración que se logra con este tipo de membranas permite que se genere un efluente de muy alta calidad, eliminando los procesos típicos de sedimentación y filtración de las plantas de tratamiento de agua residual convencionales. Y ya que los BRM no requieren del proceso de sedimentación, el proceso biológico puede operar con concentraciones más altas de sólidos suspendidos en el licor mezclado. Esto reduce de manera importante el número de tanques necesarios para la operación y permite que plantas de tratamiento en operación puedan actualizarse sin la necesidad de agregar más tanques al proceso.

Actualmente existen seis tipos de configuraciones de membranas indicadas para algún tipo de proceso:



1. De fibras huecas
2. En espiral
3. Tubular (multi-tubular)
4. Plana
5. Capilar
6. Cartucho filtrante plisado

Tabla 1.2 – Configuraciones principales de membranas

Configuración	Promoción de turbulencia	¿Retrolavado requerido?	Aplicación
Cartucho Filtrante	Muy pobre	No (Algunos cartuchos sí, pero no los filtros plisados)	Aguas con bajos sólidos suspendidos totales, microfiltración.
Plana	Regular	No (Algunos sí)	Ultrafiltración, ósmosis inversa.
Espiral	Pobre	No	Ósmosis inversa/nanofiltración, ultrafiltración.
Tubular	Muy buena	No	Microfiltración (flujo cruzado)/ultrafiltración, nano filtración, aguas con altos sólidos suspendidos totales.
Tubo Capilar	Regular	Si	Ultrafiltración.
Fibras Huecas	Muy pobre a Regular	Sí	Microfiltración/ultrafiltración, ósmosis inversa

(Judd, 2006)

Del listado anterior, únicamente las membranas planas, tubulares y de fibras huecas son las que funcionan exitosamente en los procesos BRM. Esto se debe principalmente a que los módulos deben permitir turbulencia y debe ser posible una limpieza efectiva (Tabla 1.2). Dichas membranas se describen a continuación:

Membrana tubular

La configuración de la membrana tubular (también conocida como multi-tubular) consiste en un módulo cilíndrico, el cual almacena a su vez varios tubos (también de forma cilíndrica). La forma en que funciona es que el agua residual que alimenta al sistema fluye a través de la membrana en forma de tubo, donde el agua es sometida al proceso de ultrafiltración para que posteriormente el permeado que sale de los tubos sea conducido hacia algún almacenamiento de agua clarificada. Es importante mencionar que el flujo es de adentro hacia afuera y que los productos que se retienen son recirculados por el proceso hasta que las partículas que no son capaces de atravesar la membrana semi-permeable se limpian en el lavado físico o químico de la membrana, Figura 1.3. En la Figura 1.4 se pueden ver algunos ejemplos de membranas con configuración tubular y en la Figura 1.5 se puede apreciar un sistema de ultrafiltración con configuración tubular instalado en una planta de tratamiento de aguas residuales.

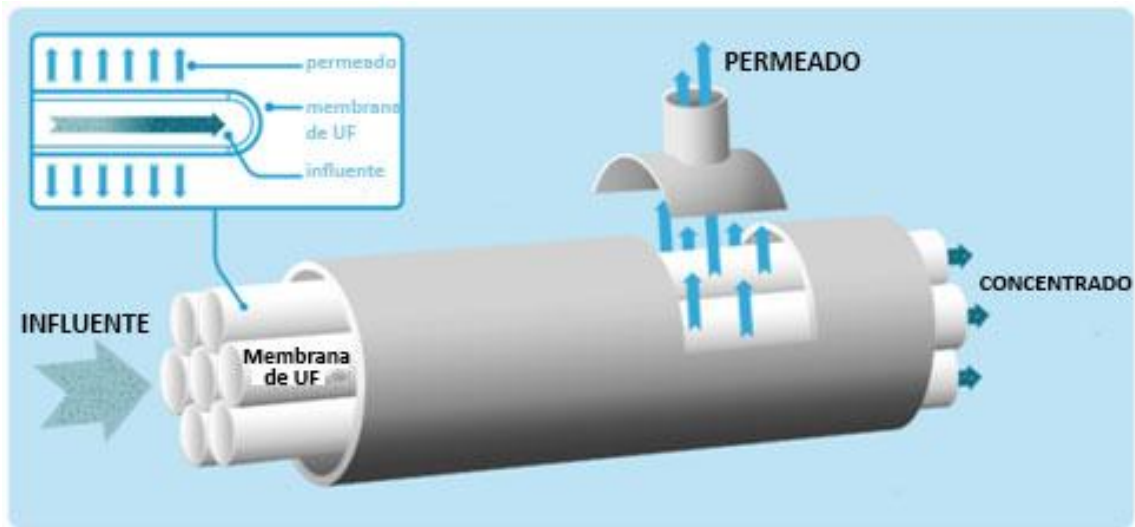


Figura 1.3 – Funcionamiento de la configuración de membrana tubular. (Koch membrane systems, 2013)



Figura 1.4 – Ejemplos de membranas tubulares de diferentes fabricantes. (Kraume, 2007)



Figura 1.5 – Membranas tubulares instaladas en una planta de tratamiento. (Judd, 2013)

Membranas planas

Este tipo de configuración consiste en una membrana que es de geometría rectangular y plana, que se asemeja a una hoja de papel, aunque pueden existir otras geometrías para módulos que estén diseñados para rotar. Dicho elemento se conoce como panel y la mayoría de paneles son semirrígidos o algunos son flexibles montados en un marco rígido. El flujo alimentador se hace pasar perpendicularmente por la parte externa de la membrana en donde el permeado sale de la parte interna. Los lodos son elevados por medio de burbujas de aire que producen aireadores ubicados en la parte inferior de los módulos. Algunos productos permiten que las membranas sean apiladas, haciendo diversas capas y permitiendo que menos partículas sólidas pasen debido a sus barreras múltiples. Usualmente, por su simplicidad de operación, este tipo de membranas se emplean para la configuración de los sistemas BRM de membrana sumergida (Figura 1.6). En la Figura 1.7 se muestra un sistema de membranas planas instaladas.

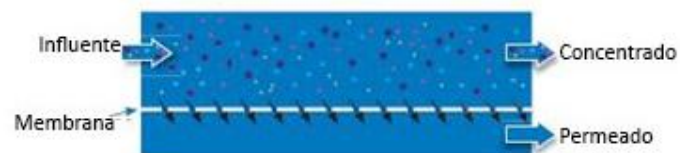


Figura 1.6 – Funcionamiento de la configuración de membrana plana. (Alfa aval, 2000)



Figura 1.7 – Sistema de membranas planas instalado. (Judd, 2013)

Membrana de fibras huecas

La membrana, que en este tipo de configuración consiste en una serie de fibras huecas de forma cilíndrica, es colocada en forma vertical con aireadores integrados ya sea en el módulo o en el marco. Las fibras usualmente tienen una cierta holgura, la cual les permite moverse lateralmente para que las burbujas de aire limpien la membrana y a su vez dispersen lo sólidos suspendidos. Contrario a la configuración de membranas tubulares, el flujo en esta configuración de membrana es de afuera hacia adentro (Figura 1.8). Este tipo de membranas se utiliza casi exclusivamente en la configuración de los sistemas BRM de membrana sumergida, y es aplicable tanto para uso industrial como municipal. Cuando se trata de plantas con grandes capacidades, el uso de este tipo de membranas es preferido porque tienen una menor demanda de energía de aireación. En las Figuras 1.9 y 1.10 se muestra el funcionamiento de un sistema de membranas de fibras huecas instalados en una planta de tratamiento.



Figura 1.8 – Funcionamiento de configuración de membrana de fibra hueca. (New Water Inc., 2007)

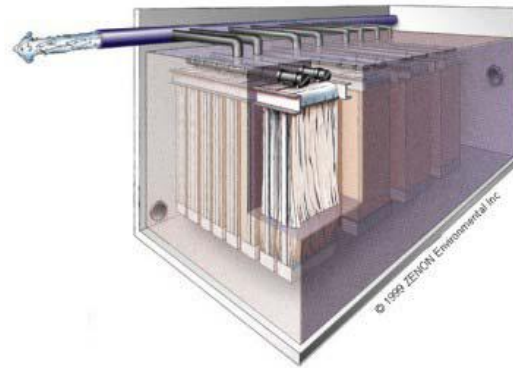


Figura 1.9 – Funcionamiento de un sistema de membranas de fibra hueca. (Fitzgerald, 2008)



Figura 1.10 – Sistema de membranas de fibra hueca instalado. (Judd, 2013)

1.3 Tipos de membranas y características

Las membranas son usualmente categorizadas en cuatro tipos, microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, y ósmosis inversa. A grandes rasgos, la membrana de microfiltración es capaz de remover materia suspendida y coloides del agua, por lo que tiene la capacidad de remover turbiedad y algunos microorganismos. La ultrafiltración es útil para separar macromoléculas orgánicas y hasta cierto grado, también es capaz de remover todos los patógenos y básicamente producir agua con contenido orgánico reducido y con un grado de desinfección importante. La ósmosis inversa puede remover sustancias orgánicas de bajo peso molecular y sales disueltas, por lo que se produce agua de calidad potable. Se puede decir que la nanofiltración se encuentra entre la ultrafiltración y la ósmosis inversa, remueve iones multivalentes, frecuentemente se utiliza para remover la dureza del agua así como compuestos orgánicos de peso molecular relativamente bajos. Cabe mencionar que existen otras clasificaciones e incluso más subdivisiones, pero escapan a los alcances de esta tesis.

En cuanto al tamaño de separación, las membranas de microfiltración tienen un tamaño de poro que está en el ámbito de 0.1 a 5 μm , es el más grande de los cuatro tipos de membranas, lo que permite que sea operada con presiones bajas y necesite consumir relativamente poca energía. La ultrafiltración



tiene un ámbito del tamaño de poro de 0.1 a 0.01 μm ; debido al decremento en el tamaño de poro, la presión requerida es mayor por lo que el consumo energético aumenta. Para la microfiltración y ultrafiltración el mecanismo de separación (el cual básicamente es el tamizado) tiende a ser afectado por otros factores como la carga en los contaminantes y en las membranas y las interacciones de las partículas se convierten en un factor muy importante mientras los tamaños de poro se hacen más pequeños. Los ámbitos del tamaño de poro para la nanofiltración y ósmosis inversa son de 0.001 a 0.1 μm y de 0.0001 a 0.001 μm , respectivamente. A diferencia de la microfiltración y ultrafiltración, el mecanismo de separación no es por tamizado porque iones posiblemente hidratados pueden penetrar a través de este tipo de mecanismo, por lo que se analizan fenómenos como la disolución, difusión e interacciones electrostáticas con la membrana. En la Figura 1.11 se puede observar qué tipo de materiales comunes pueden ser removidos con los cuatro diferentes tipos de membranas; también se observa lo que remueven la membrana comercial Zeeweed (empleada en la planta Cauley Creek, de la cual se hablará en el siguiente capítulo) y la filtración convencional.

Tabla 1.3 – Tabla de resumen de las características típicas de membranas utilizadas en el tratamiento de agua residual.

Tipo de membrana	Valores típicos de tamaño de poro, [μm]	Valores típicos de presión de operación, [kPa]	Flux [$\text{L}/\text{m}^2\text{d}$]
Microfiltración	0.08-2	7-100	405-1600
Ultrafiltración	0.005-1	70-700	405-815
Nanofiltración	0.001-0.01	500-1000	200-815
Ósmosis inversa	0.0001-0.001	850-7000	320-490

(Metcalf, 2003)

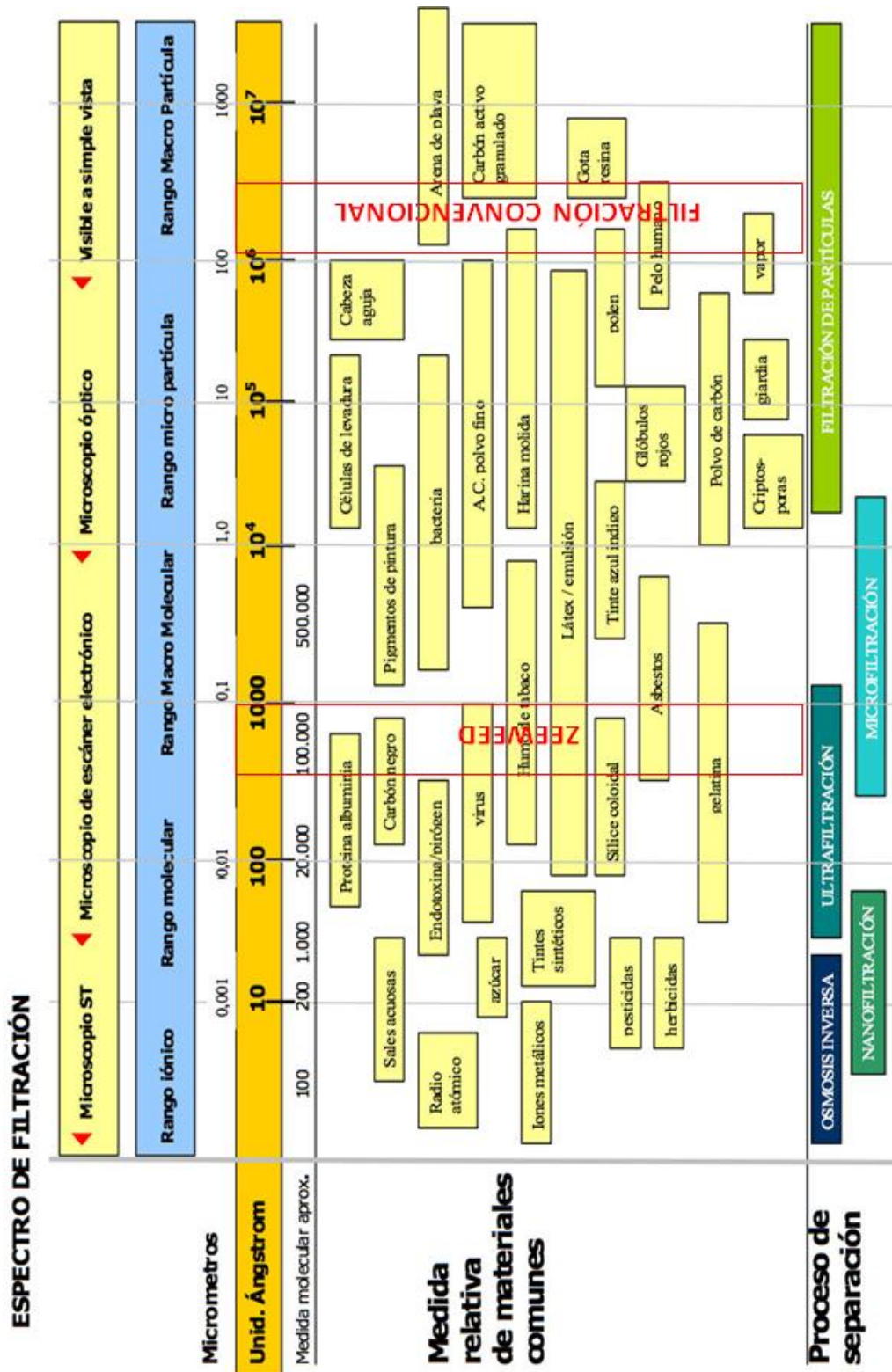


Figura 1.11 – Espectro de filtración. (ASYSA, 2013)



Existen diversos materiales con los que se pueden fabricar membranas, usualmente son plásticos o cerámicos, aunque también existen materiales metálicos. Las membranas en los procesos BRM han de tener la capacidad de no pandearse ni doblarse cuando se hace el retrolavado, a su vez, tienen que ser biodegradables para cuando su vida útil ha terminado y tener la capacidad de resistir ataques químicos cuando se les tiene que dar mantenimiento. Entre los principales materiales utilizados, se encuentran: acetato de celulosa, triacetato de celulosa, polietileno (de alta densidad), poliéter sulfona, poliácridonitrilo, difluoruro de polivinilideno, polipropileno, polisulfona, politetrafluoroetileno, entre otros.

Aunque se han realizado investigaciones para desarrollar membranas de cerámica con características atractivas como estabilidad térmica y resistencia química, han tenido bastantes limitaciones para aplicaciones de tratamiento de aguas debido principalmente a su costo relativamente más elevado que las membranas hechas de plásticos (polímeros).

No obstante que está fuera del alcance de este trabajo, es necesario destacar que la química del proceso es otro aspecto importante. La naturaleza química de superficie de las membranas puede variar bastante de su composición general. La diferencia de la composición de la superficie puede ser posible debido a modificaciones posteriores o en alguna etapa de su fabricación. Esta composición química de la superficie de las membranas es muy importante debido a que con ella surgen propiedades importantes al proceso de filtración, como la hidrofilia, hidrofobia, resistencia térmica y a químicos, biocompatibilidad (en caso de separaciones con organismos biológicos), presencia de carga iónica, entre muchas otras propiedades.

Otra categorización de las membranas utilizadas regularmente se refiere a su estructura o morfología. Las membranas sintéticas se clasifican en densas y porosas. A diferencia de las membranas porosas, las membranas densas no tienen poros y la separación se realiza mediante disolución y difusión, usualmente su aplicación es para nanofiltración y ósmosis inversa. Las membranas porosas, son aquellas que separan el material mediante exclusión, no dejando pasar partículas que tienen mayor tamaño que su poro, se emplean en ultra y microfiltración. Finalmente, cabe mencionar que dentro de esta clasificación se pueden también categorizar las membranas con base en la homogeneidad de su estructura, siendo isotrópicas o anisotrópicas. Las isotrópicas tienen una estructura homogénea de todas sus propiedades y actúan como medio filtrante y soporte simultáneamente. Las membranas anisotrópicas tienden a cambiar sus propiedades de acuerdo al espesor y cuentan con un medio filtrante que va soportado por un medio poroso.

1.4 Fundamentos de la filtración con membranas

Formas de operación

- Filtración en línea

Esta forma de operación permite que todo el fluido pase a través de la membrana perpendicularmente y es la forma más común en la filtración convencional. Tiene la desventaja de que se aglomeran las partículas con mayor facilidad en la superficie de la membrana (Figura 1.12).

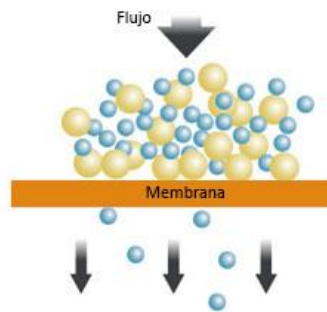


Figura 1.12 – Filtración en línea o filtración convencional. (Synder Filtration, 2008)

- Filtración tangencial

También conocida como filtración de flujo cruzado, tiene la característica de que el flujo es paralelo a la superficie de filtración. La ventaja de esta forma de filtración es que mientras algunas partículas están atravesando la membrana, el agua sigue fluyendo tangencialmente y limpiando de cierta forma la membrana, permitiendo que muy pocas partículas se acumulen (Figura 1.13).

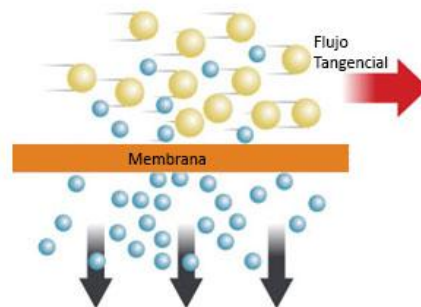


Figura 1.13 – Filtración tangencial. (Synder Filtration, 2008)

Principio básico de la filtración con membranas y terminología

Como se ha mencionado, la semipermeabilidad de la membrana es lo que ayuda a la separación física de los sólidos y líquidos; para ultra y microfiltración es un proceso en el cual los componentes se mantienen sin cambios químicos. Se le conoce como permeado o filtrado a los componentes que logran pasar a través de la membrana, mientras que a los componentes que no logran atravesarla se les conoce como retenido o concentrado (Figura 1.13).

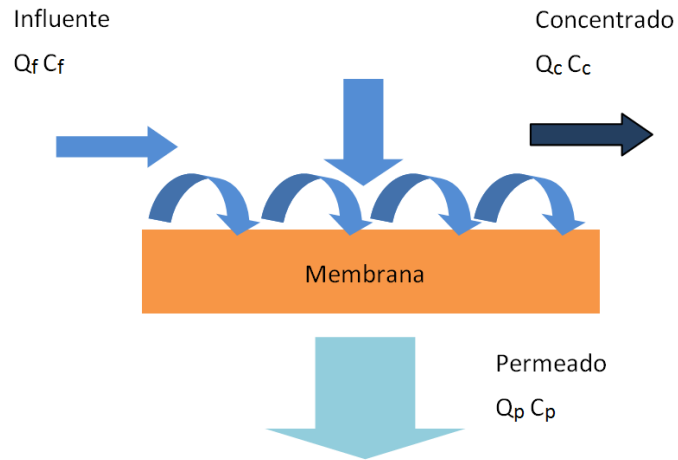


Figura 1.14 – Términos básicos de filtración con membrana. (Radjenović, 2008)

Haciendo referencia a la Figura 1.13, podemos hacer un balance de masa del soluto en el proceso y llegar a la siguiente expresión:

$$Q_f c_f = Q_c c_c + Q_p c_p$$

Donde:

Q_f = gasto de influente

c_f = concentración de soluto en el influente

Q_p = gasto de permeado

c_p = concentración del permeado

Q_c = gasto de concentrado

c_c = concentración de soluto en el concentrado

El rechazo (coeficiente de rechazo) de los solutos de la membrana se puede calcular con la siguiente expresión:

$$R = \frac{c_f - c_p}{c_f}$$

Donde:

c_f = concentración de soluto en el influente

c_p = concentración del permeado

A la parte del influente que se convierte en permeado se le llama *recuperación* de agua o *rendimiento*, el cual está dado por la siguiente expresión:

$$Y = \frac{Q_p}{Q_f}$$

Donde:

Q_f = gasto de influente

Q_p = gasto de permeado



La recuperación es bastante alta para filtraciones en línea, mientras que para filtraciones tangenciales varía de manera significativa, dependiendo de la naturaleza de la membrana y del diseño del proceso.

Otros conceptos de suma importancia para la filtración con membranas es el *flux* y la *presión transmembrana*.

El flux del permeado (normalmente denominado J), es el volumen de agua que pasa por unidad de área por tiempo y usualmente está normalizado a una temperatura estándar. Las unidades más comunes para el flux son $[L/m^3d]$; gran parte de proveedores y la literatura referente a sistemas BRM prefieren manejar esas unidades más que las del SI.

El flux está directamente relacionado con la fuerza impulsora, que es la presión transmembrana (conocida como TMP o ΔP) para el caso particular de los BRMs. La presión transmembrana es la diferencia de presión entre el lado del retenido y el lado del permeado de la membrana. El rendimiento de la membrana puede ser estimado por medio de la permeabilidad de la membrana (K), definida como la relación entre el flux y la presión transmembrana.

La expresión para calcular el flux es la siguiente:

$$J = \frac{\Delta P}{\eta_p R}$$

Donde:

$J = Flux$

$\Delta P = presión transmembrana$

$\eta_p = viscosidad del permeado$

$R = resistencia de filtración$

A partir de estos conceptos fundamentales, se derivan la mayoría de expresiones para el diseño y operación de la filtración con membranas y sistemas BRM.

1.5 Comparación entre sistemas BRM y sistemas de lodos activados convencionales (LAC)

Como se ha visto a través de este capítulo, los sistemas de reactores biológicos de membrana y los sistemas convencionales de lodos activados son muy similares, y tienen el objetivo de producir un efluente de cierta calidad, mediante un proceso biológico. Sin embargo, la principal diferencia es cómo se realiza la separación de sólidos y líquidos. En un sistema BRM, los sólidos se remueven mediante ultrafiltración o nanofiltración con membranas, mientras que en los sistemas de lodos activados, dicha separación se realiza con clarificadores o sedimentadores.

Otra diferencia relevante es el nivel de tratamiento de los sistemas; con los sistemas BRM se obtiene una calidad de efluente de tratamiento terciario (debido a la ultrafiltración) y en los sistemas de LAC una calidad de nivel secundario. Lo comentado anteriormente se ilustra con los diagramas de los dos procesos (Figuras 1.14 y 1.15). Otro aspecto que se observa al comparar dichas ilustraciones es que en

los sistemas BRM el número de procesos del tren de tratamiento disminuye, por lo que a su vez disminuye la superficie total necesaria y el impacto ambiental de las plantas de tratamiento. Con relación al área requerida, una ventaja de los sistemas BRM sobre los sistemas de LAC es cuando se requiere la ampliación de plantas existentes; la razón es que los BRM tienen una configuración modular y pueden adaptarse a cualquiera de los dos sistemas, sin necesidad de mucho espacio ni de grandes costos de infraestructura, ya que únicamente se le tienen que agregar módulos al sistema. Ya sea que alguna planta esté operando con un sistema BRM o LAC, cuando es necesaria la ampliación de una planta de tratamiento, la opción más viable son precisamente sistemas BRM. Como ejemplo se menciona la ampliación de la planta de Cauley Creek, un sistema BRM que amplió su capacidad al doble empleando otro sistema BRM, como se describe en el Capítulo 2. Otro ejemplo interesante es el de una planta de tratamiento de aguas residuales con un sistema LAC en Brescia, Italia. Una de las compañías pioneras en sistemas BRM, General Electric, acudió a la necesidad de dicha planta para reemplazar una línea de tratamiento y, según un estudio de la compañía, de un espacio requerido de 4,900 m² con tecnología convencional, se logró utilizar únicamente un espacio de 2,450 m² instalando un sistema BRM para una capacidad de 41,800 m³/s (Alcarria, 2011, p.127).

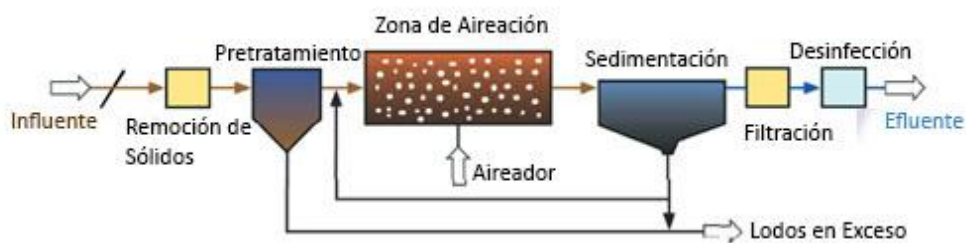


Figura1.15 – Diagrama de un sistema de lodos activados convencional. (Kraume, 2007)

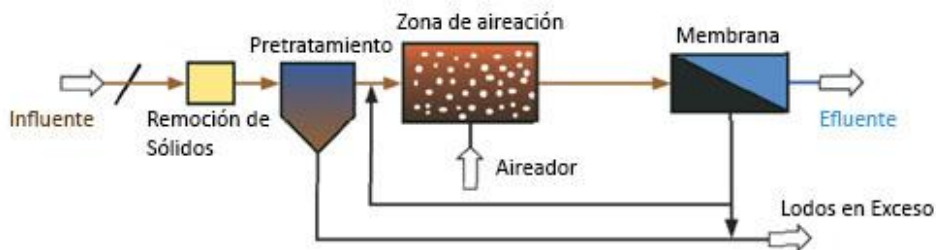


Figura1.16 – Diagrama de un sistema BRM con membrana externa. (Kraume, 2007)

Una de las razones por las que los sistemas BRM ocupan menor superficie que los sistemas LAC es que tienen altas concentraciones de biomasa dentro del reactor biológico. Usualmente para sistemas BRM se tiene concentraciones de licor mezclado de 8,000 a 12,000 mg/L y ocasionalmente más altas, mientras que en los sistemas LAC se manejan concentraciones de 2,000 a 7,000 mg/L. Los sistemas BRM ocuparán siempre menor superficie ya que, al operar con altas concentraciones de licor mezclado, requieren menor volumen de aireación.



Las altas concentraciones de licor mezclado en los sistemas BRM también ayudan a incrementar el tiempo de retención de sólidos, que es usualmente mayor a 15 días, propiciando mejor nitrificación, consideración importante para asegurar una calidad de efluente consistente. En contraste, los sistemas LAC operan con tiempo de retención de sólidos menor a 10 días, lo que se refleja en un influente de menor calidad, como se había mencionado. Los tiempos altos de retención de sólidos también permiten que exista menor frecuencia en la deshidratación de lodos, debido al alto contenido de sólidos, y que se tengan menores costos de operación.

Otro ángulo importante a considerar para comparar los dos sistemas son las necesidades de oxígeno. Este factor es muy importante, porque el satisfacer los requerimientos de oxígeno tiene implicación directa con el consumo energético y con costos de operación. Los sistemas BRM, debido a la nitrificación y limpieza de la membrana, además de las necesidades de oxígeno del reactor biológico, requieren de mucho más oxígeno que los sistemas de LAC. Incluso en los sistemas BRM más avanzados, se requiere de más de 0.1 kWh/m^3 (Buer and Cumin, 2010) que es mucho mayor a la energía necesaria en la sedimentación por gravedad. La transferencia de oxígeno en los sistemas BRM demanda más energía debido a que se trabaja con concentraciones de licor mezclado más altas, la viscosidad del fluido aumenta y disminuye la eficiencia en la transferencia de oxígeno.

En cuanto a la operación los sistemas de LAC tienen muchos factores que cambian con respecto a las características de sedimentación de los lodos. Esto requiere de tiempo para el análisis de diversas muestras de lodos en el laboratorio y posteriormente se tienen que ajustar los ciclos del proceso para mantener unas buenas características de sedimentación de los lodos y no comprometer la calidad del efluente. En los sistemas BRM las pruebas de laboratorio son reducidas ampliamente ya que se trabaja con altas concentraciones de licor mezclado y tiene la capacidad de tolerar calidad de agua variable, además de que la sedimentación de lodos no es un problema en este tipo de sistemas. Con los avances tecnológicos de los sistemas BRM, diversos sistemas funcionan de manera automatizada, lo que facilita la operación y también es menor el número de procesos requeridos que los sistemas de LAC. Ahora, una dificultad importante para los sistemas BRM en cuanto a la operación es el ensuciamiento y taponamiento de las membranas, esto muchas veces ocasiona que se necesite detener algún tren de tratamiento o que se requiera alguna limpieza química porque el rendimiento de las membranas deja de ser el adecuado.

Finalmente, los sistemas BRM están en constante evolución y se están convirtiendo en sistemas de tratamiento de agua residual altamente eficientes, y competitivos a los sistemas de LAC, especialmente cuando se requiere de una alta calidad del efluente. A lo largo del tiempo, se ha observado que procesos BRM de altas capacidades han logrado ahorrar energía de manera eficiente, principalmente con la optimización de procesos de aeración para la limpieza de las membranas. Sin embargo, implicaciones como el ensuciamiento de las membranas sigue siendo un reto significativo para este tipo de procesos debido a la energía necesaria y a la limpieza que se requiere. Sistemas de LAC son sistemas actualmente preferidos en muchos países debido a que a lo largo de los años han tenido buenos resultados y se tiene un completo control en todos sus procesos, pero los avances y la investigación en los procesos BRM están logrando que dichos sistemas se empiecen a implementar y se consideren como una solución alternativa para el tratamiento de aguas residuales.



CAPÍTULO 2 – PROYECTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE CAULEY CREEK, DULUTH, GEORGIA, ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

El objetivo principal de las plantas de tratamiento de agua residual es permitir que los efluentes municipales e industriales tengan una disposición que no ponga en riesgo la salud humana u ocasione algún daño inaceptable e irreversible al medio ambiente, sin importar su configuración o su sistema de tratamiento. En lo particular, la planta de Cauley Creek ubicada en el estado de Georgia, se planeó, diseñó y construyó para satisfacer diferentes necesidades de la zona en la que se ubica y cumplir con rigurosas restricciones impuestas por los usuarios y los organismos reguladores del estado. El proyecto de Cauley Creek es pertinente como caso de estudio por las siguientes razones:

1. Muestra el desarrollo de la tecnología de membranas para el tratamiento de aguas residuales municipales.
2. Ejemplifica la conveniencia de efectuar inversiones económicas en el tratamiento de aguas residuales para la protección de los ecosistemas acuáticos y, en consecuencia de fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano, y
3. Ilustra que en los países desarrollados se mitigan los impactos de los proyectos desde la planeación y no de manera correctiva, no obstante que el objetivo de los proyectos sea el proteger al ambiente por sí mismo.

A lo largo de este capítulo, se hará una descripción de algunos aspectos de planeación que llevaron a que la planta de Cauley Creek tuviera éxito, así como la descripción general y detallada del proceso de tratamiento que se observó durante la visita técnica a la planta.

2.1 Planeación de la planta de tratamiento de Cauley Creek

En la ingeniería civil, la planeación tiene como propósito establecer los objetivos y evaluar los medios para poner en práctica el plan y los resultados del mismo (Glynn, Heinke, 1999, p. 354). Día con día los retos a los que se enfrentan las diferentes disciplinas de esta profesión incrementan en su complejidad y cada vez es más difícil encontrar el equilibrio entre las necesidades y la utilización de los recursos para que las dos partes en conjunto tengan un resultado positivo. Es por eso que la planeación no sólo consiste en diseñar e implantar el proyecto sino que se debe de preocupar por otorgar una idea clara de los problemas y de las diferentes alternativas posibles para poder determinar la mejor opción ante las restricciones impuestas.

Las etapas del proceso de planeación se agrupan en tres categorías, formulación, evaluación y adopción. En la primer categoría se parte de que los promoventes del proyecto estén consientes de la necesidad de planear. Sabiendo que la planeación es necesaria, se establecen grupos adecuados de trabajo y sus responsabilidades para que lleven a cabo el proceso de planeación y con esto se pueden fijar los objetivos, asegurándonos que se haga una revisión constante mientras el proceso de planeación avanza para mantener las metas prácticas. La segunda categoría engloba lo que es la elaboración de presupuestos para tener una mejor dotación de información y lograr mejores decisiones, análisis de enfoques alternativos para la generación de alternativas satisfaciendo las restricciones impuestas y el

análisis costo beneficio en donde se cuantifican los beneficios tangibles y los costos en términos monetarios para seleccionar la mejor opción con respecto al presupuesto disponible. Finalmente la última categoría se encarga de seleccionar una alternativa con base en la información disponible, demostrar y verificar que la opción seleccionada es la adecuada y adoptar un programa y evaluarlo con las revisiones necesarias. Después que se llevaron a cabo estas tres etapas, se realiza la ejecución del proyecto. Estas tres categorías trabajan conjuntamente para lograr que reduzca la incertidumbre y las acciones incorrectas, así como asegurar el éxito del proyecto aprovechando oportunidades.

A través del tiempo se han visto graves errores de planeación en los proyectos, y se sabe que hasta un pequeño error puede tener consecuencias muy serias. La realidad es que los errores suceden y hasta los profesionales más competentes pueden cometer alguna equivocación. Es por eso que la planeación adquiere mayor importancia en los grandes proyectos de ingeniería civil, minimizando de manera importante los posibles errores y entregando a los usuarios la infraestructura necesaria en calidad, costo y tiempo. A continuación se describe un proyecto que contó con una planeación adecuada, la planta de Cauley Creek.

Características generales del medio natural y socioeconómico de la zona de estudio

La planta de Cauley Creek se ubica en Estados Unidos de América, específicamente en el Estado de Georgia, dentro de la ciudad de Duluth. Las Figuras 2.1 a 2.3 muestran un mapa de su ubicación, una imagen satelital y una vista aérea.

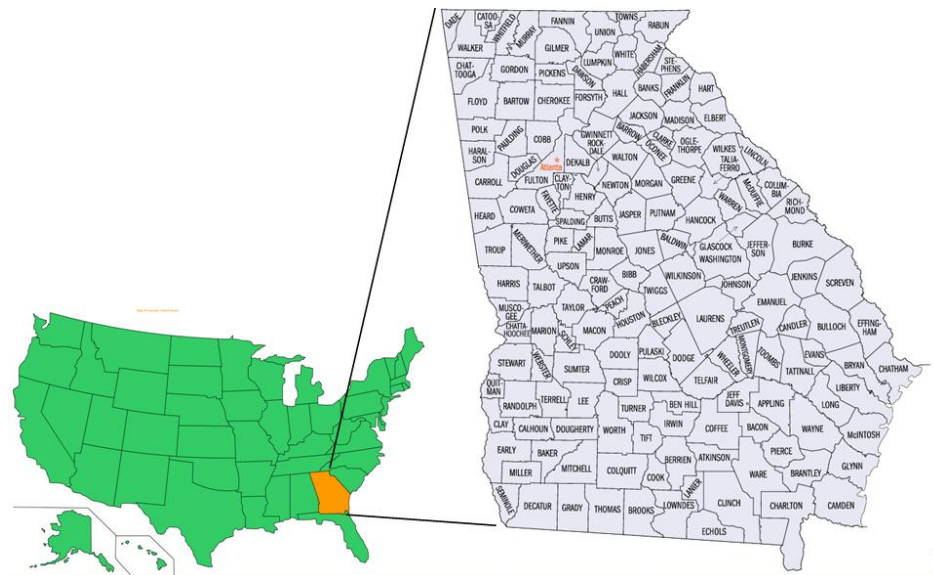


Figura 2.1 – Ubicación Geográfica de la planta de Cauley Creek. (Santillana, 2011)



Figura 2.2 – Imagen satelital de la planta de Cauley Creek. (Google Maps)



Figura 2.3 – Imagen aérea de la planta de tratamiento de agua residual. (EDT, 2009)

Clima

Durante la mayor parte del año, el clima de esta zona se caracteriza por ser cálido, húmedo y templado. La temperatura promedio de Duluth, Georgia es de 15.07 [°C], inferior a la temperatura promedio del estado de Georgia, de alrededor de 16.83 [°C], y por encima de la temperatura promedio de los Estados Unidos, que es del orden de 12.47 [°C]. En la Figura 2.4 se puede observar la temperatura mensual en el Estado de Georgia, en Duluth y en los Estados Unidos, donde se aprecia que los meses con mayor temperatura son los de junio, julio, agosto y septiembre. Para fines comparativos, la temperatura promedio que presenta la zona de México con clima templado se encuentra entre 18 y 22 [°C].

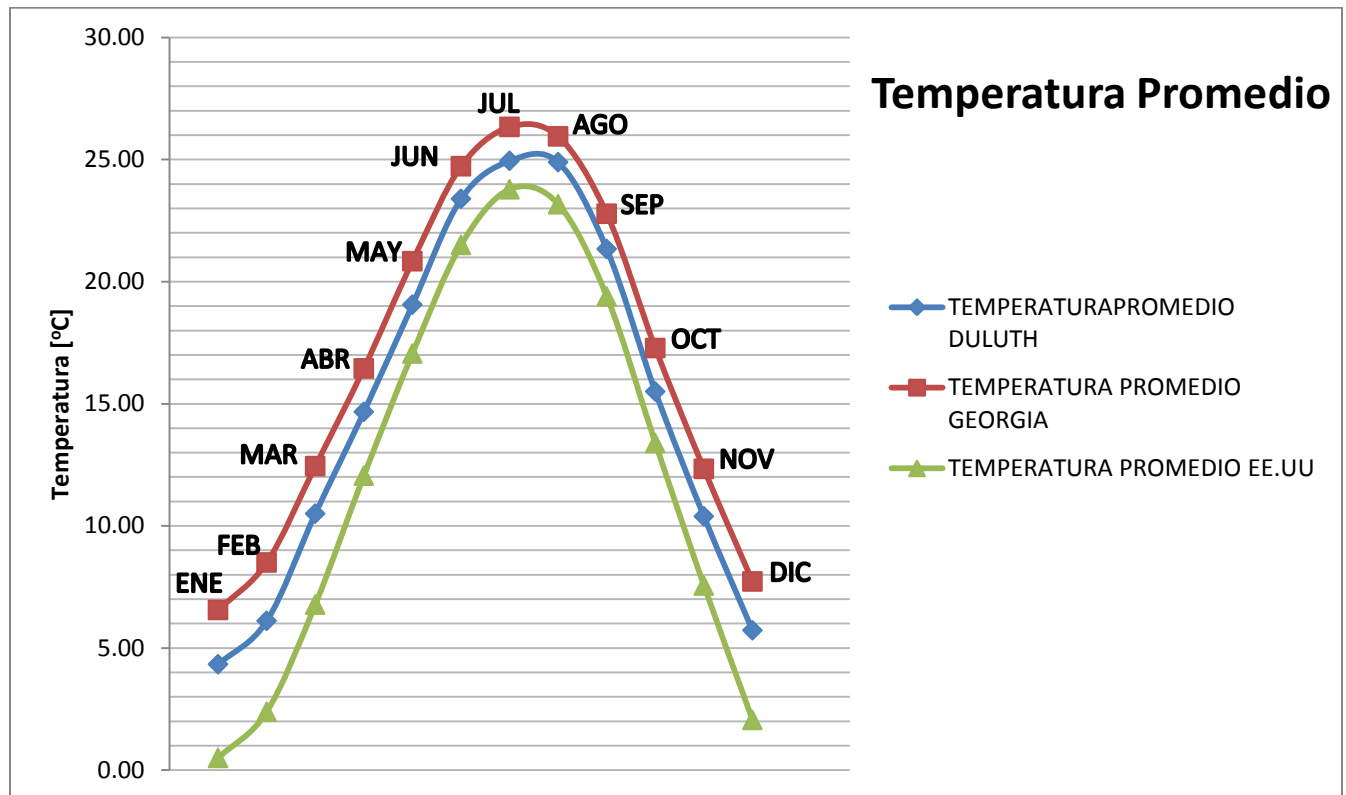


Figura 2.4 –Temperatura promedio mensual. (World Media Group, 2013)

La información anterior indica que en general el clima tiende a ser favorable para actividades que involucran el uso del agua, siendo un clima cálido de abril a octubre y relativamente frío de enero a marzo y de octubre a diciembre. Es importante mencionar que la temperatura del agua tiene notable relevancia en el tratamiento biológico ya que se pueden presentar efectos desfavorables en la operación de la planta. La temperatura afecta la velocidad con la cual reacciones químicas se llevan a cabo por lo que temperaturas bajas son desfavorables en algunos procesos por ejemplo la desinfección del agua. El otro proceso que afecta importantemente la temperatura es el proceso biológico, ya que los microorganismos encargados de degradar la materia orgánica se vuelven menos activos mientras más frío sea el ambiente en el que estén, lo que a su vez reduce la actividad biológica del proceso de manera considerable. Es por esto que al operar plantas con temperaturas bajas en invierno, como la de Cauley Creek, se tiene que implementar algunas alternativas para solucionar el bajo rendimiento de los microorganismos en el tratamiento biológico, tales como aumentar la temperatura del agua residual, incrementar la actividad biológica o reducir la recirculación de lodos.

En el diseño de la planta, también es importante considerar las épocas de lluvias y de estiaje para estimar cuando se demanda más agua tratada, esto en conjunto con los estudios hidrológicos, nos proporcionan parámetros importantes para hacer un correcto diseño. La Figura 2.5 resume los datos de la precipitación promedio mensual del estado de Georgia y de la ciudad de Duluth.

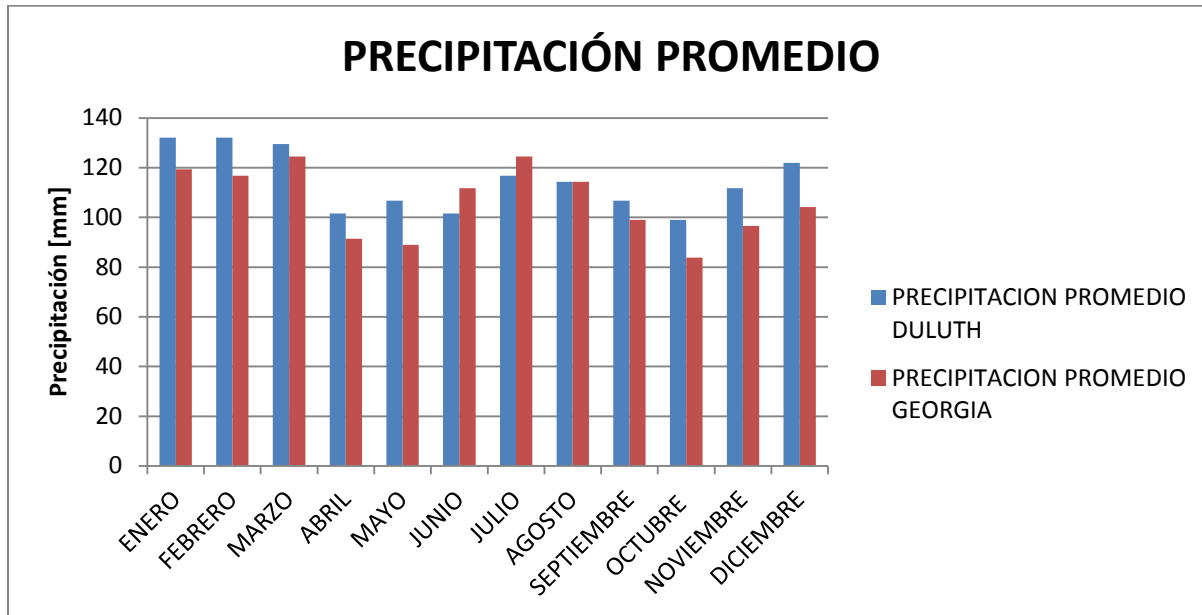


Figura 2.5 –Precipitación promedio mensual de Duluth y del estado de Georgia. (World Media Group, 2013)

Hidrología

Georgia y algunos estados colindantes se encuentran dentro de las cuencas de los ríos Apalachicola, Chattahoochee y Flint

El río Chattahoochee, que significa “piedra pintada” en un idioma nativo de la región, drena un área de 22,714 km² y es el recurso de agua más explotado en el estado de Georgia. El río Chattahoochee nace desde la corriente de la cold-water mountain en la provincia de Blue Ridge con altitudes por encima de los 900 metros y fluye aproximadamente 690 kilómetros hasta la confluencia con el río Flint. Dicho río ha tenido descargas históricas que fluctúan entre los 13.6 y 5409 [m³/s] en Columbus, Alabama. A través de su longitud, el flujo del río es controlado por presas de sistemas hidroeléctricos, que operan cuando la demanda es mayor. A diferencia del cauce principal del río, la mayoría de sus tributarios fluyen libremente.

El río Flint tiene una longitud aproximada de 560 km y drena un área de 21,911 km²; la mayoría de los tributarios del río están ubicados en provincia Coastal Plain. La descarga del río Flint desemboca en Newton, Georgia, en donde las descargas diarias oscilan entre 26.11 y 1331 [m³/s]. Esta cuenca cuenta únicamente con dos presas de sistemas hidroeléctricos que no afectan de manera apreciable el flujo del río. Se ha notado que en los meses de invierno se incrementa los flujos en esta cuenca.

El río Apalachicola fluye sin barreras por 170 kilómetros desde la presa Jim Woodruff hasta el Golfo de México. El río drena una superficie de 6,730 [km²], teniendo unas descargas diarias promedio registradas en un rango de 164 a 5,040 [m³/s]. Debido a los patrones de distribución de la lluvia, el río Chattahoochee tiene una mayor contribución de flujo al río Apalachicola que el río Flint, sin embargo,

durante periodos de sequía extrema, la mayor contribución proviene del río Flint que tiene un flujo base sostenido por descargas de aguas subterráneas. En la Figura 2.6 se muestra la ubicación de las cuencas que componen la zona en donde se ubica la planta de tratamiento de aguas residuales de Cauley Creek.

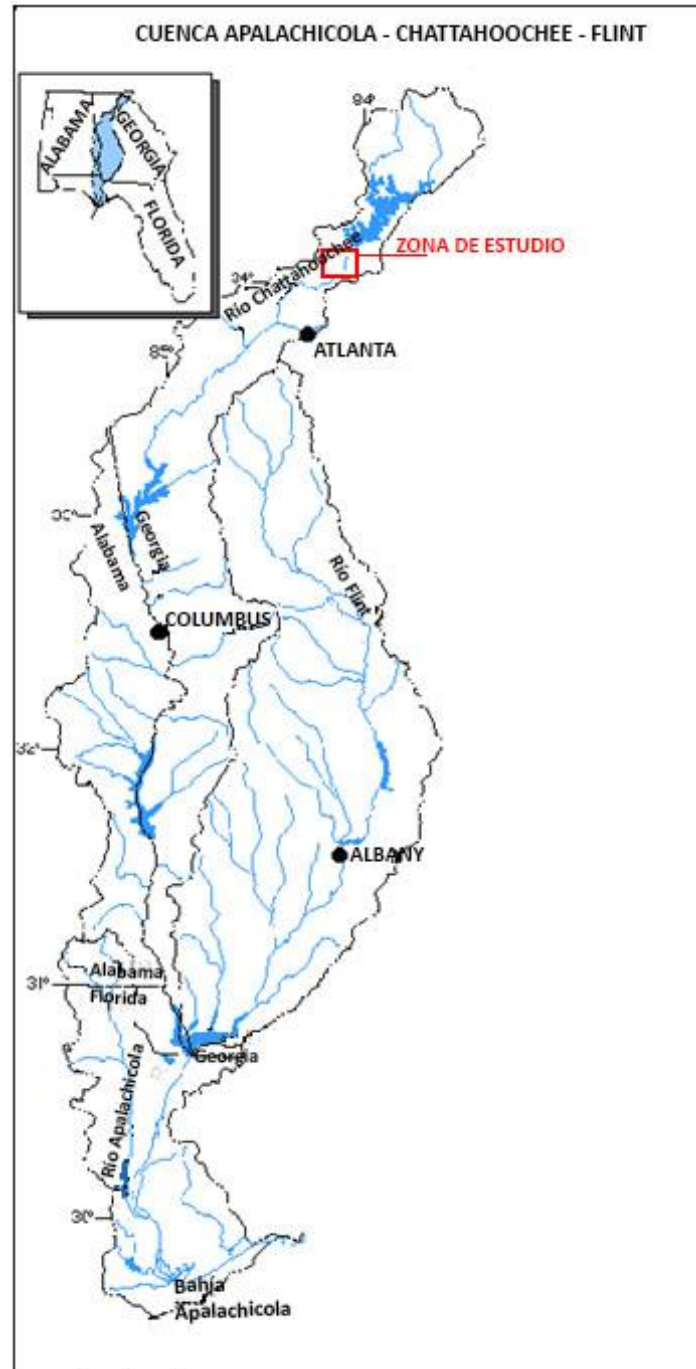


Figura 2.6 – Ubicación de cuencas de Chattahoochee, Apalachicola y Flint. (USGS, 2013)



Demografía

La ciudad de Duluth está ubicada en la parte oeste del condado Gwinnett y aproximadamente 32 kilómetros al noreste de Atlanta. Duluth tiene colindancias con el condado de Fulton y la ciudad de Johns Creek y está situada entre las ciudades de Berkeley Lake y Suwanee. La ciudad de Duluth cuenta con un área de 2607 hectáreas.

La población de Duluth en el último censo (2010) fue de 26,600 habitantes. La Tabla 2.1 muestra el cambio de la población a través del tiempo de Duluth y del Estado de Georgia.

Tabla 2.1 – Cambio de la población a través del tiempo en Georgia y Duluth

AÑO	POBLACIÓN GEORGIA [hab]	POBLACIÓN DULUTH [hab]
1970	4,589,575	1,810
1975	-	2,133
1980	5,463,105	2,956
1985	-	5,448
1990	6,478,216	9,029
2000	8,186,453	22,122
2010	9,687,653	26,600
2030	12,000,000+	34,000+

(USGS, 2013)

Se observa que la población tuvo un incremento de más del doble del año 1990 a 2000, este ha sido el crecimiento más alto que ha tenido Estados Unidos, donde por primera vez Georgia era el estado con la mayor tasa de crecimiento del sur del país. Sin duda alguna esta fue una de las principales razones por la cual la planta de tratamiento de Johns Creek se acercaba a su capacidad de diseño, lo que llevo a la construcción de la planta de Cauley Creek y posteriormente a su ampliación.

Usos del suelo

El uso del suelo en la zona de interés básicamente consiste en usos de agricultura, urbanos, bosques y humedales. La distribución del uso del suelo se muestra en la Figura 2.7

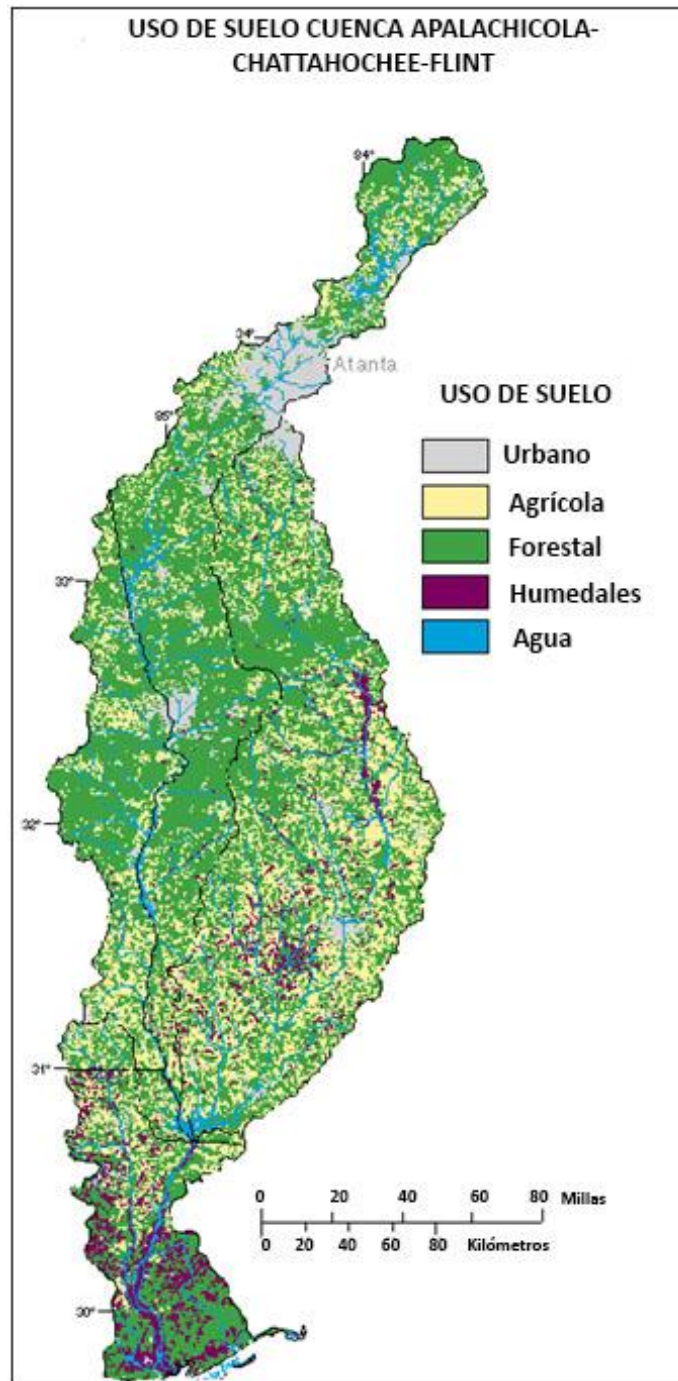


Figura 2.7 – Uso del suelo en la cuenca de los ríos Chattahoochee, Flint y Apalachicola. (USGS, 2013)



Justificación y objetivos del proyecto

El condado de Fulton, contaba únicamente con la planta de tratamiento de agua residual ubicada en la cuenca de Johns Creek y la fuente más cercana de abastecimiento de agua potable es el río Chattahoochee. Debido al incremento de demanda en los servicios, la planta de Johns Creek se estaba acercando peligrosamente a su capacidad de diseño por lo que no podía manejar flujos de agua residual de nuevos proyectos en la zona. Para complicar el problema, la falta de lluvia en la zona en épocas de estiaje y la necesidad de agua por parte de diversos usuarios generaban la preocupación de que serían impuestas muchas limitaciones en la cantidad de agua a ser extraída del río Chattahoochee utilizada principalmente para usos agrícolas.

La solución a esta problemática fue la construcción de la planta de tratamiento de agua residual de Cauley Creek en abril del 2002. Dicha planta de tratamiento inicialmente tuvo una capacidad para tratar un flujo promedio de 9,500 metros cúbicos por día, pero posteriormente las autoridades del condado de Fulton autorizaron una ampliación de la planta para tener una capacidad instalada para tratar un flujo de 19,000 m³/d en octubre del 2002; dicha ampliación fue realizada en abril del 2004.

Medio socioeconómico

Debido a que la planta de tratamiento de aguas residuales de Cauley Creek está localizada en una zona densamente poblada, y en el centro de una comunidad exclusiva donde las casas tienen costos que oscilan entre \$350,000.00 y \$1,500,000.00 dólares.

Medidas de mitigación de los impactos como parte de la planeación

El hecho de no producir olores ni ruido era un requerimiento clave para el diseño de la planta. Con base en esto, para mitigar el impacto ambiental, la planta fue diseñada para verse como una granja, la cual incluye una barda con estacas, una veleta en forma de gallo y vacas de plástico de tamaño real para que la planta se adaptara al área agrícola.

Además, la planta utiliza una unidad de control de olor de carbón activado para tratar el aire en las instalaciones.

Dentro de las instalaciones se incluyen cribado del influente por medio de rejillas de 2mm de tamaño de abertura, desarenadores, centrífugas duales y almacenamiento de lodos secos. La unidad de carbón activado permite la regeneración de carbón, lo que reduce significativamente los costos de operación y de disposición. Otra característica interesante de la planta es que la unidad de control de olor es compacta, por lo que se reduce el espacio requerido en la planta.

En la zona de ubicación de la planta se requiere que los niveles de presión acústica a una distancia de 46 metros de cualquier parte de la planta fuera menos de 70 decibeles. Este requerimiento se cumplió gracias al diseño arquitectónico de la planta. Dentro de la estructura, todos los sopladores, aireadores y dispositivos ruidosos que son parte del proceso fueron alojados en cuartos que cuentan con atenuación

de sonido, lo que redujo los niveles de presión acústica a 60 decibles. En aproximadamente 10 años de operación, la planta nunca tuvo quejas acerca de olores ni ruido por parte de sus vecinos.

En la ampliación de la planta, aparte de incrementar la capacidad al doble, se incorporaron algunas mejoras, entre las cuales están: tratamiento biológico para remoción de fósforo para reducir el consumo de sustancias químicas, un espesador de lodos para minimizar el volumen del digestor aerobio, y un limpiador de superficie del licor mezclado para reducir formación de nata y espuma. En la Tabla 2.2 se muestran las características y el rendimiento de diseño de las dos fases de la planta de Cauley Creek.

La planta de tratamiento de Cauley Creek es una de las plantas con mayor capacidad que utiliza la tecnología de biorreactores de membrana. La razón de la elección del empleo de dicha tecnología en una planta de gran capacidad fueron los retos estéticos, de calidad del agua y de espacio en una zona sensible previamente mencionados y, también se tomó una decisión con base en que el costo de agua reutilizada es considerablemente más bajo que el costo de agua potable.

Como dato adicional se puede mencionar que gracias al proyecto de la planta de tratamiento de Cauley Creek, se empezaron a construir líneas para la distribución de agua tratada que, si se maneja de forma adecuada y se cuenta con los recursos, eventualmente podrá abastecer a todo el condado.

Tabla 2.2 – Características y rendimiento de diseño de las dos fases de la planta de Cauley Creek

Fase I Planta	Fase II - Expansión
Capacidad de 9,500 [m ³ /d]	Capacidad de 19,000 [m ³ /d]
Características: <ul style="list-style-type: none">• 2 Biorreactores + 4 tanques ZeeWeed• Limpieza de recuperación en situ• Aireación Cíclica• Adición de cloruro férrico	Características: <ul style="list-style-type: none">• 4 Biorreactores + 8 tanques ZeeWeed• ZeeWeed Espesador de Lodos• Remoción de nata y espuma
Eficiencia de Diseño: Turbiedad < 0.5 UTN Nitrógeno Total < 5 mg/L Fosforo Total < 0.13 mg/L	Rendimiento de Diseño: Turbiedad < 0.5 UTN NH ₃ -N < 0.5 mg/L Nitrógeno Total < 10 mg/L Fosforo Total < 0.13 mg/L



2.2 Diseño de la planta de tratamiento de Cauley Creek

La planta de Cauley Creek le da un tratamiento terciario al agua residual debido a la gran calidad de agua que se permite obtener con los biorreactores con membranas. Debido a que los organismos reguladores demandan la remoción de nutrientes, es un proceso con un tratamiento biológico un poco más elaborado que tratamientos convencionales. A continuación se enumeran las diferentes fases del proceso de tratamiento:

- 1) Tratamiento preliminar
- 2) Tratamiento biológico
- 3) Desinfección y reutilización

En la Figura 2.8 se muestra el diagrama de flujo de la planta

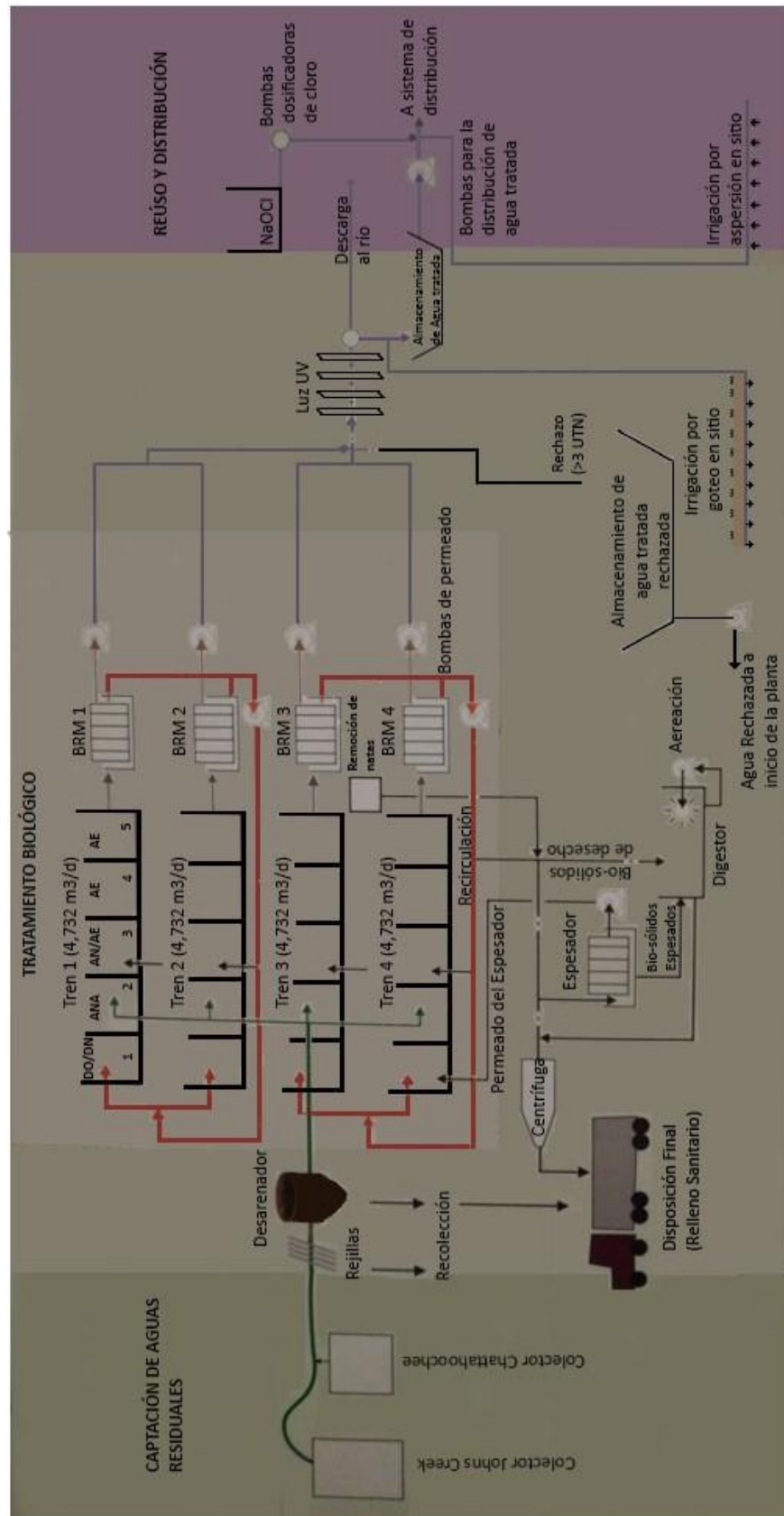


Figura 2.8 – Diagrama de flujo de la planta de Cauley Creek



Descripción general del sistema de tratamiento de la Planta de Cauley Creek

El proceso empieza en la obra de toma de aguas residuales que abastecen a la planta. El condado de Fulton cuenta con un sistema de alcantarillado en donde diversos colectores provenientes principalmente del campus ambiental de Johns Creek y de las zonas circundantes dan origen al influente de la planta.

Después de la captación de aguas residuales se inicia el pretratamiento, que incluye rejillas de diferentes tamaños y un desarenador para remover partículas discretas, que por su tamaño puedan dañar equipos electromecánicos o taponear tuberías más adelante en el proceso de tratamiento. Los escombros y demás partículas grandes son recolectados y mandados a disposición final a un relleno sanitario.

El siguiente subsistema es el de tratamiento secundario, ya que esta planta no cuenta con tratamiento primario. El objetivo principal del subsistema secundario es la remoción de partículas orgánicas y nutrientes, principalmente el fósforo y el nitrógeno. La planta actualmente tiene cuatro trenes de tratamiento biológico, y cada tren está integrado por cinco etapas o zonas, numeradas del uno al cinco en la Figura 2.8 (1-Zona de Desoxigenación/Desnitrificación, 2-Zona anaeróbica, 3-zona anóxica/aeróbica y por último las zonas 4 y 5 -aeróbicas). El influente llega a la etapa 2 de tratamiento biológico, donde, después de pasar por las etapas de tratamiento 2, 3, 4 y 5, el agua residual es llevada hacia membranas de ultrafiltración para la remoción de bacterias, sólidos suspendidos y clarificación del agua. Al salir de las membranas el permeado es bombeado hacia el tratamiento terciario y el concentrado es recirculado a la etapa 1 donde ocurre la desnitrificación y nuevamente el flujo se lleva por las cuatro etapas siguientes de tratamiento biológico.

El tratamiento terciario básicamente consiste en la desinfección mediante luz ultravioleta. El permeado de las membranas tiene que tener la calidad necesaria para su desinfección, por lo que hay una línea de rechazo para el agua que tenga una turbiedad mayor a 3 UTN donde se recolecta y se bombea al inicio de la planta para volverse a tratar.

Posterior a su desinfección, el agua tratada es reutilizada en el sitio para la irrigación por goteo y por aspersores de terrenos circundantes. El agua tratada también es aprovechada por escuelas, campos de golf y otros usuarios con fines de irrigación y por medio de una línea de distribución y equipos de bombeo que maneja gastos de 32 litros por segundo. Antes de que se lleve el agua tratada a los usuarios que la requieran, se adiciona cloro mediante unas bombas dosificadoras para asegurar que el agua llegue con la calidad que la necesitan los usuarios. Dependiendo de las condiciones clima o a las estaciones del año, la planta de Cauley Creek también tiene el permiso de descargar el agua tratada directamente al río Chattahoochee debido a la alta calidad de agua que se descarga.

Como producto del tratamiento biológico se tienen espumas y natas, las cuales se van directamente a un digestor para una degradación adicional de partículas orgánicas. También parte de los lodos recirculados por las membranas se tienen que desechar, por lo que se mandan a un espesador de lodos que descarga también al digestor previamente mencionado. Todos los lodos desechados por el proceso

de tratamiento que llegaron al digestor, se manda a una centrifuga para deshidratarlos y llevarlos a disposición final a un relleno sanitario.

Tratamiento Preliminar

El tratamiento preliminar consiste en rejillas móviles de banda convencionales, seguidas por un desarenador de vórtice y finalizando con rejillas finas (integradas en la ampliación).

Rejillas convencionales y finas

Originalmente, la planta de tratamiento empezó utilizando rejillas móviles de banda convencionales con una apertura de poro de 2mm y con limpieza automática para proteger a las membranas. Con el paso del tiempo, se observó que sólidos con tamaños superiores a 2mm estaban pasando a los reactores. Se llegó a la conclusión que las rejillas estaban dejando pasar sólidos que no debían pasar, lo que ocasionó un problema considerable porque las membranas se estaban ensuciando y taponeando mucho antes de lo previsto. Esto a su vez tuvo como consecuencia mayores costos de operación porque las membranas se tenían que sacar de operación de forma manual para su limpieza aproximadamente dos veces por año.

La solución la proporcionó la compañía de Parkson Corporation, empleando su producto llamado Rotomesh, el cual consiste en una rejilla fina de tambor rotativo con orificios de 1mm. Debido al diseño innovador de dicha rejilla, no permite que material fibroso (como cabellos, pelusas y otras fibras) y otros sólidos se alineen con los orificios de la rejilla y pasen.

El funcionamiento de la rejilla es bastante simple, el caudal ingresa por la entrada y fluye a una caja de entrada, cae en cascada sobre los vertedores y entra en contacto en el cilindro giratorio (Ver Figura 2.9).

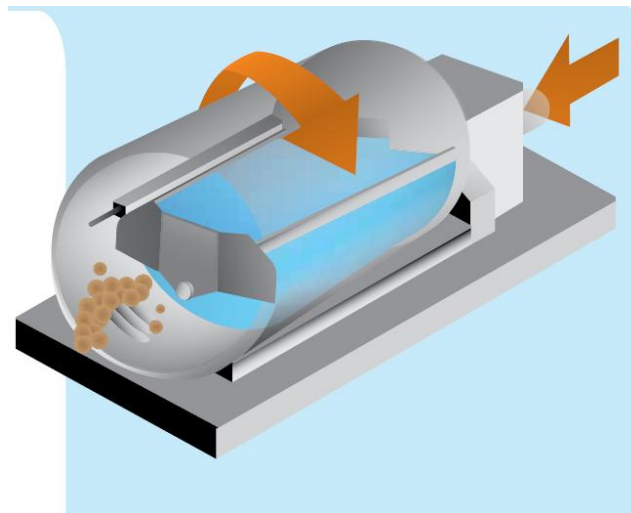


Figura 2.9 – Esquema de la rejilla fina de tambor giratorio Rotomesh (Parkson, 2010)

En la planta de Cauley Creek se colocaron dos rejillas Rotomesh aguas abajo de las rejillas originales. Tienen la característica particular que descargan el material a un compactador para remover el agua en exceso. Los resultados de la instalación de dichas rejillas excedieron las expectativas, en la Tabla 2.3 se presentan los porcentajes de remoción de sólidos que se presentaron después de que el agua residual pasó por las rejillas originales con orificios de 2 mm y las rejillas Rotomesh.

Tabla 2.3 – Porcentajes de remoción de sólidos de las rejillas Rotomesh

PORCENTAJES DE REMOCIÓN	
Sólidos Suspendidos Totales	9%
DBO	11%
Grasas y Aceites	14%

(Parkson, 2010)

Los beneficios de las rejillas para un sistema BRM son extender la vida de las membranas, reducir costos de operación, mejor calidad en los lodos y reducción en el desecho de lodos, minimizar el mantenimiento de las membranas (especialmente en la limpieza), entre otros. En las Figuras 2.10 y 2.11 se pueden apreciar algunas fotos de las rejillas de la planta de Cauley Creek.



Figura 2.10 – Rejillas finas de tambor rotativo. (Parkson, 2010)

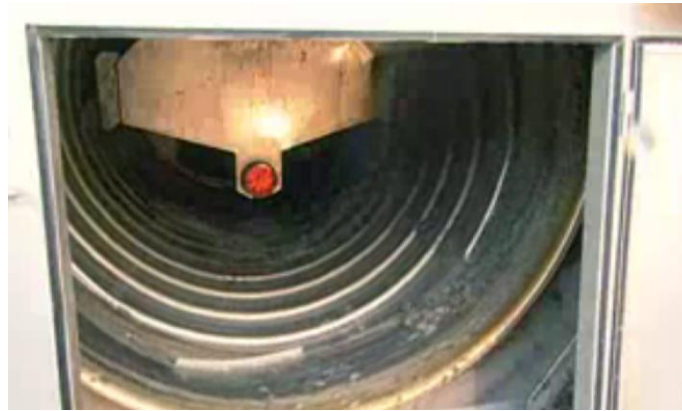


Figura 2.11 – Interior de rejillas finas de tambor rotativo. (Parkson, 2010)

Desarenador de Vórtice

Después de que el agua residual fluye a través de las rejillas de banda convencionales, se emplea un desarenador de vórtice para la continuación de la remoción de partículas grandes como gravas y arenas que pueden ocasionar excesivo mantenimiento o dañar algunos equipos como bombas o taponear las membranas que se encuentran después en el tren de tratamiento. También las arenas, gravas y partículas finas pueden ocasionar la obstrucción de tuberías o canales. Otra razón importante de porque es necesario remover dichas partículas, es que se pueden sedimentar en cualquiera de los reactores o tanques, lo cual crea problemas para su operación y limpieza. El lector se puede apoyar en la Figura 2.12 para entender el funcionamiento del desarenador de vórtice. El flujo entra al desarenador y es dirigido para crear una corriente circular o vórtice. Esta corriente crea un área de baja velocidad al centro del tanque, lo cual provoca que las partículas de arena y grava más pesadas tiendan a caerse al fondo del tanque y sean recolectadas para mandarse a disposición final a un relleno sanitario.

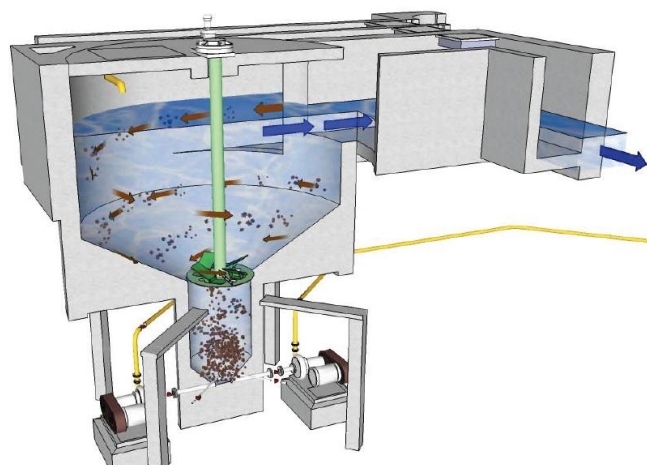


Figura 2.12 – Desarenador de Vórtice. (Fulton county, 2010)

Tratamiento Biológico

Como se ha comentado el proyecto de la planta de Cauley Creek tuvo dos fases, la primera para que tuviera una capacidad de tratamiento de 9,500 metros cúbicos por día y la segunda fue la expansión de esa capacidad a 19,000 metros cúbicos por día. La fase uno y la fase dos tuvieron diferentes tipos de configuraciones para el tratamiento biológico debido al cambio de capacidad y con el propósito de ahorrar en los requerimientos de sustancias químicas y tener un tratamiento más eficiente. A continuación se describen los procesos de tratamiento de cada fase y algunas consideraciones de diseño.

- Tratamiento Biológico de la Fase 1

La planta fue diseñada originalmente con dos trenes de tratamiento biológico cada uno con dos tanques de membranas, la configuración del proceso y un diagrama de flujo se muestran en las Figuras 2.13 y 2.14, respectivamente. El proceso biológico lo conforman cinco zonas: una zona pre-anóxica, dos zonas aerobias, una zona post-anóxica y tanques con membranas ZeeWeed separados. Existe otro tanque aireado que almacena los lodos desechados antes de que se lleven a la centrifuga para su deshidratación. Se agrega un coagulante metálico en la forma de cloruro férrico (FeCl_3) para la remoción química del fósforo e hidróxido de sodio (NaOH), para ajustar el pH. Ambas sustancias químicas se dosifican de acuerdo con un monitoreo del agua residual cruda, antes de combinarlo con los lodos activados que recirculan del tanque de las membranas. El tiempo de retención hidráulica total para la fase I fue de 9.5 horas. Aproximadamente el 26% (2.5 horas) se destinó al volumen anóxico y el 74% (7.0 horas) al volumen aerobio (incluyendo a los tanques con membranas). En esta fase, la planta tenía la flexibilidad de operar las zonas aerobias con aireación encendida o apagada, para lograr una nitrificación y desnitrificación simultánea, ahorrando en costos energéticos y teniendo una recuperación de alcalinidad.

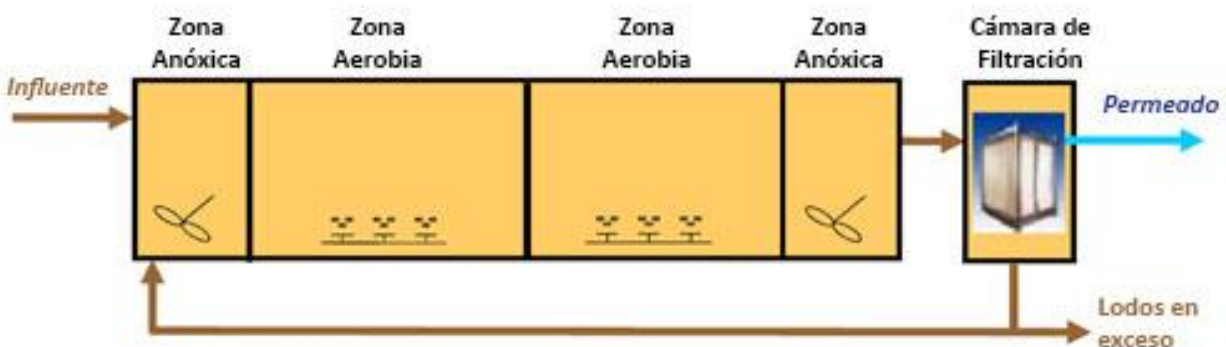


Figura 2.13 – Configuración de proceso de la fase uno. (Peeters, 2008)

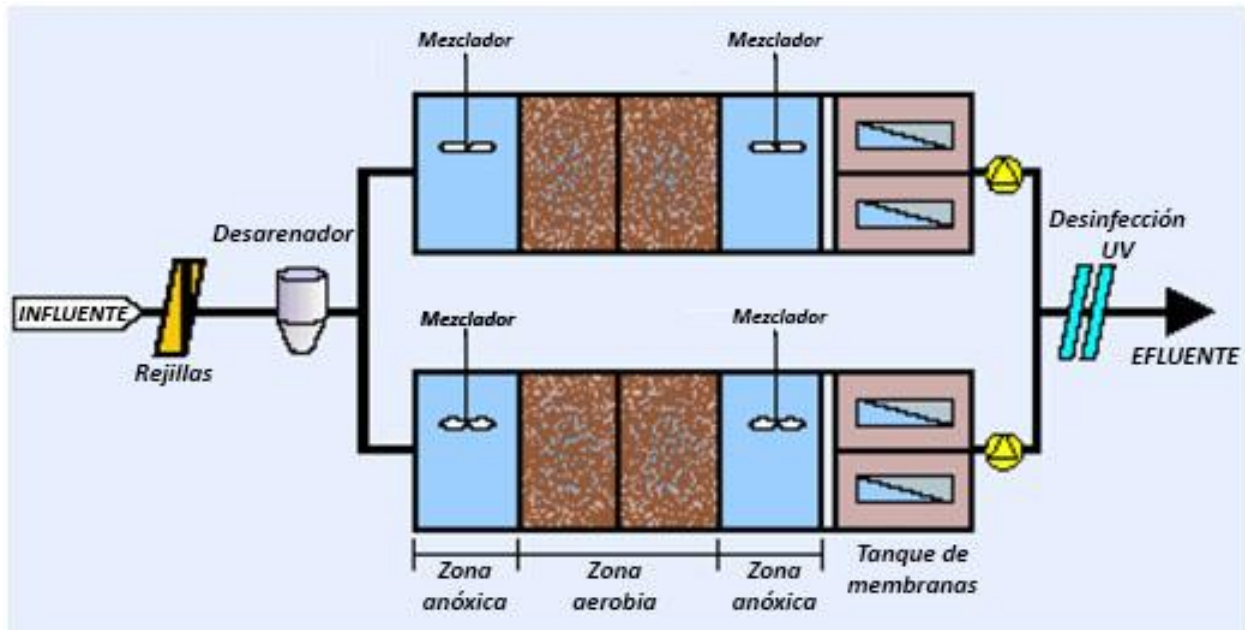


Figura 2.14 – Diagrama de flujo fase uno. (Yiantsios, 2007)

La planta de Cauley Creek tenía que satisfacer un efluente con un límite de contenido de fósforo total menor a los 0.18 mg/L y un límite de amoníaco menor a los 0.13 mg/L para descargas en invierno. La planta no tenía limitaciones con respecto a nitrógeno total ni a los nitratos. Para lograr los límites impuestos por los organismos reguladores del estado en cuanto a fósforo total, se tenía que agregar una dosis de cloruro férrico por encima de los 70 mg/L y una dosis de sosa cáustica por encima de los 90 mg/L. En la temporada de verano no se empleaba cloruro férrico.

Se notó que las altas dosis de cloruro férrico y la baja alcalinidad del influente obligaban a proveer de altas dosis de sosa cáustica para ajustar el pH a un nivel aceptable. Mientras que la denitrificación en las primeras cuatro zonas del tratamiento biológico permitían una recuperación considerable de alcalinidad, no era suficiente para mantenerla en los niveles deseables de pH mayor a 6.5 sin una alta dosificación de sosa cáustica. Debido a que el costo de la sosa cáustica y cloruro férrico junto con el costo de la disposición de lodos era una fracción importante de los costos de operación de la planta, los propietarios decidieron investigar el uso de un tratamiento biológico para remoción de nutrientes mejorado para reducir los costos de operación en la expansión de la planta.

- Tratamiento Biológico de la Fase 2

La realización de la ampliación de la planta y el mejoramiento del tratamiento biológico de la fase dos tuvo importantes limitaciones de tiempo, por lo que no se tuvo la oportunidad de la realización de pruebas piloto experimentales. Y ya que existía limitada información publicada acerca del diseño de plantas con BRM y tratamiento biológico mejorado, ZENON, la compañía encargada en el diseño del proceso de tratamiento, utilizó información y experiencia de varios estudios piloto y diversas plantas a



gran escala, junto con una modelación detallada y simulaciones utilizando el software BioWin. También se realizó la caracterización detallada del agua residual para alimentar al modelo con datos reales para poder diseñar y optimizar un proceso adecuado para la ampliación de la fase dos. El objetivo de la ampliación era un diseño con un tratamiento biológico para la remoción de nutrientes mejorado con nuevos tanques y adaptar el mismo proceso a la planta de la fase uno sin agregar más tanques. Se consideraron diversas configuraciones para el mejoramiento del tratamiento biológico con las modificaciones correspondientes para tomar en cuenta algunas características de los procesos con BRM como los altos niveles de oxígeno disuelto en el reciclado del licor mezclado.

El análisis y el proceso de diseño involucraron una serie de pasos para determinar el diseño final que satisfacía los objetivos. El primer paso consistió en la revisión de datos de diseño y operación de la planta existente, el segundo en la caracterización del agua residual y determinación de parámetros clave y finalmente el tercero en la determinación de la configuración apropiada.

En el primer paso se recopilaron y revisaron muchos datos históricos de operación junto con datos de mucho tiempo de una planta de la zona para determinar los parámetros de diseño, presentados en la Tabla 2.4 junto con los límites del efluente requeridos. Cabe mencionar que el diseño y el rendimiento de un proceso de tratamiento biológico dependen de la caracterización del agua residual y la configuración específica del proceso.

Tabla 2.4 – Parámetros de diseño del influente y límites del efluente

PARÁMETRO	INFLUENTE DE DISEÑO	LIMITES DE EFLUENTE
Demanda Química de Oxígeno, [mg/L]	570	-
DBO ₅ , [mg/L]	220	<2.9
SST, [mg/L]	225	<5.0
Amoniaco, [mg/L]	32	<0.5
Fósforo Total, [mg/L]	7.5	<0.13
Alcalinidad (CaCO ₃), [mg/L]	130	-
Temperatura, [°C]	14	-

(Dodson, 2008)

En lo que concierne al paso dos, seleccionar una configuración del proceso no fue tarea fácil debido a que existen muchas posibilidades para mejorar el tratamiento biológico que se tenía en la fase 1 y que la mayoría de estos procesos biológicos fueron originalmente diseñados para procesos de lodos activados convencionales con sedimentadores secundarios. Son muchos factores los que se necesitan considerar



para seleccionar una configuración adecuada como los requerimientos de efluente, temperatura, características del agua residual y la preferencia de la empresa que operará la planta. Otro factor que afecta bastante la selección de configuración son las consideraciones adicionales únicas de los procesos de BRM. Sin embargo, los mismos fundamentos aplicados en los procesos con lodos activados convencionales pueden ser aplicados con los procesos de BRM con la consideración de los siguientes factores:

- Nitrificación completa

En las plantas con sistemas de BRM se necesita la completa nitrificación para minimizar el taponamiento de las membranas. Esto produce nitratos que deben ser manejados apropiadamente para minimizar el impacto en la zona anaerobia aunque no se necesiten reducciones del nitrógeno total.

- Manejo del inventario de sólidos

El licor mezclado que fluye a través del sistema de BRM se concentra en los tanques de las membranas como agua limpia (permeado) y es removido por las membranas con un contenido de sólidos casi nulo. El licor mezclado concentrado debe ser recirculado para desconcentrar el tanque de membranas y mantener una mayor concentración de SSLM en el biorreactor principal. El impacto de alta recirculación (típicamente de 3 a 4 veces el gasto) en el diseño del biorreactor y en la configuración del proceso deben de ser considerados.

- Manejo de oxígeno disuelto y nitratos

El tanque con membranas es una zona aerobia con concentraciones altas de oxígeno disuelto (usualmente mayor a 4 mg/L) y de nitratos. Estas altas concentraciones en combinación con la constante recirculación del licor mezclado de la zona de las membranas deben ser consideradas detenidamente para prevenir la contaminación de las zonas aerobias y anóxicas.

- Optimización de los SSLM y energía de aireación

Como se ha mencionado anteriormente, los sistemas de BRM operan con altas concentraciones de sólidos suspendidos en el licor mezclado (entre 8000 y 15000 mg/L). Hay que encontrar un balance entre la concentración de SSLM, el tamaño del biorreactor y los costos de operación para la optimización del diseño del biorreactor.

- Remoción de fósforo

Como en cualquier proceso biológico para la remoción de nutrientes, la remoción del nitrógeno y fósforo eran procesos en constante competencia para la disponibilidad de carbón biodegradable en el reactor. La configuración del proceso también dependerá del nivel de nitrógeno y fósforo que serán removidos biológicamente y la cantidad de fósforo que será removida con la adición de un coagulante.

Para la Planta de Cauley Creek se observó que las configuraciones más adecuadas eran la configuración de la Universidad de Cape Town y la configuración de Johannesburgo. Las principales diferencias entre las dos configuraciones son el arreglo de sus zonas anaerobias y anóxicas y el reciclado del licor mezclado. En ambas configuraciones el influente llega directamente a una zona anaerobia.

La configuración del proceso de la Universidad de Cape Town consistía en una zona anaerobia seguida por una secuencia de zonas no aireadas y aireadas (Ver Figura 2.15). Se tiene una recirculación de licor mezclado del orden de 4 veces el gasto desde la zona de membranas (alta en concentraciones de oxígeno disuelto y nitrato) hasta la primera zona anóxica. También se tiene una segunda recirculación del licor mezclado que transfiere los lodos desoxigenados y parcialmente desnitrificados de la primera zona anóxica a la zona anaerobia donde es combinado con el agua residual cruda del influente.

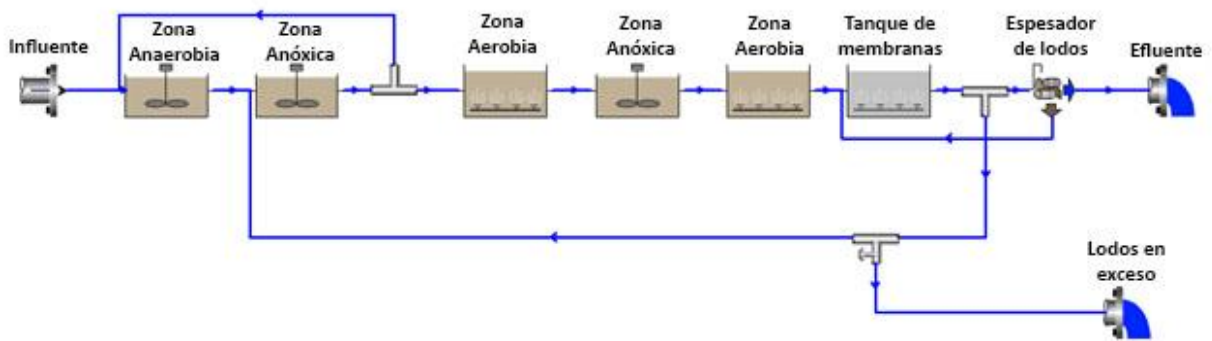


Figura 2.15 – Configuración del proceso de la Universidad de Cape Town para la ampliación de la fase 2 (Dodson, 2008)

La configuración de la Universidad de Cape Town es relativamente sencilla, pero se demostró que no fue la solución óptima para la ampliación de la planta. La principal razón fue que la fracción de biomasa total en el sistema bajo condición anaerobia es aproximadamente la mitad del volumen de la zona anaerobia por su arreglo de recirculación (Phagoo, et.al., 2005). La masa anaerobia entonces es muy pequeña para asegurar una bio-remoción de fósforo confiable y requeriría una zona anaerobia más grande. Esto ocasionó que se investigara ampliamente la otra configuración viable.

La configuración de Johannesburgo considerada para la expansión de la planta de Cauley Creek consta de 5 etapas. La primera zona es un tanque de Desoxigenación/Desnitrificación, seguido por una zona anaerobia (donde llega el influente), una zona anóxica/aerobia y por último dos zonas aerobias. Al igual que la configuración anterior, se tiene como separador de líquidos y sólidos un tanque aireado que contiene a las membranas (Ver Figura 2.16). Una característica importante de esta configuración es la inclusión de una zona no aireada a la cual se recicla una porción del licor mezclado del tanque de las membranas. El propósito de esta zona no aireada es básicamente la reducción del oxígeno disuelto en el licor mezclado para reducir la concentración de nitrato antes de que los lodos lleguen a la zona anaerobia en conjunto con el agua residual del influente.

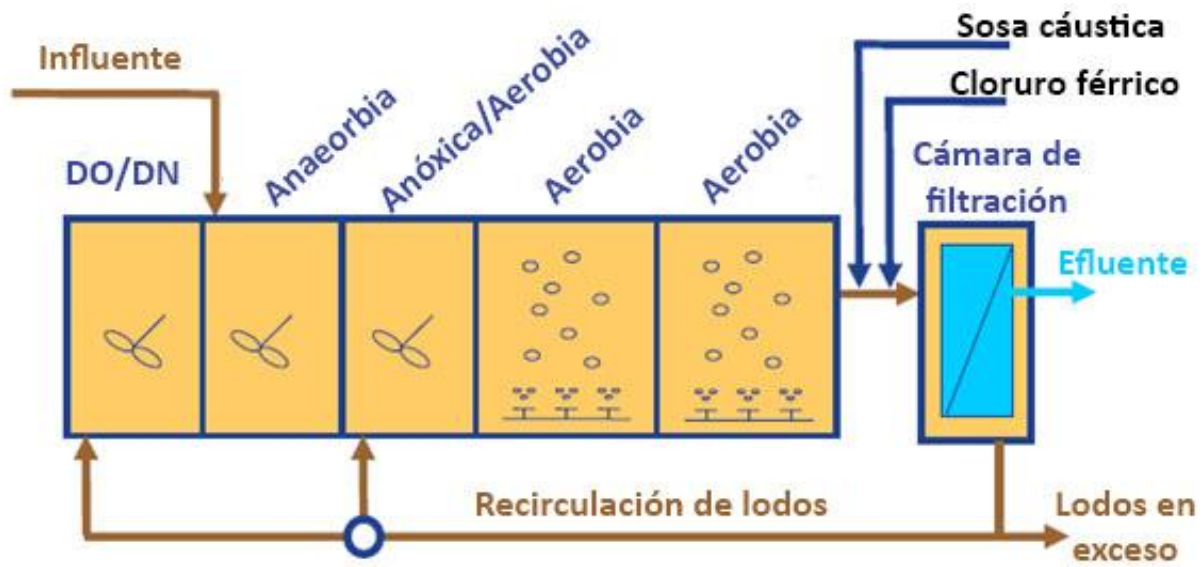


Figura 2.16 – Configuración de Johannesburg para la ampliación de la planta de Cauley Creek. (Peeters, 2008)

La porción que queda de la recirculación de licor mezclado del tanque de membranas, entra a la zona anóxica/aerobia para maximizar la desnitrificación y para recuperar alcalinidad lo cual reduce el empleo de sosa caustica. Una ventaja importante del diseño empleado es que al dividir el licor mezclado recirculado se tiene cierta flexibilidad durante la operación, lo cual ayuda a disminuir el proceso competitivo de la remoción biológica del fósforo y nitrógeno. A diferencia del proceso anterior, el porcentaje de volumen anaerobio y el porcentaje de biomasa son casi equivalentes, lo que asegura un tratamiento biológico para la remoción de fósforo mucho más confiable y la necesidad de una zona anaerobia más compacta. Esta configuración también elimina la necesidad de una recirculación de licor mezclado adicional.

Después del análisis extenso de los dos procesos mencionados anteriormente empleado el software BioWin, el proceso seleccionado para la expansión de la planta de Cauley Creek fue el de Johannesburg. La razón fue que la configuración de Johannesburg provee la ya mencionada flexibilidad de operación para tener en cuenta las posibles diferencias en las concentraciones y características del agua residual actual y la de diseño. A continuación se presenta la Tabla 2.5 que resume el volumen de los tanques, el tiempo de retención hidráulica, y el porcentaje de biomasa.

Tabla 2.5 – Diseño de la expansión de la planta de Cauley Creek

Tanque	# de Tanques	Volumen Total [m ³]	Volumen [%]	Biomasa [%]	TRH [h]
DeOx/Denit	4	1083	13.2	15.7	1.37



Anaerobio	4	1286	15.6	13.7	1.63
Anóxica/Aerobia	4	954	11.6	11.1	1.20
Aerobio 1	4	1968	24.0	23.0	2.50
Aerobio 2	4	1968	24.0	23.0	2.50
Membranas	8	954	11.6	13.5	1.20

(Dodson, 2008)

Algunas características clave de esta combinación de tratamiento biológico con BRM son las siguientes:

- El reactor existente aguas arriba del tanque de membranas fue dividido en las zonas no aireadas y aireadas requeridas instalando unos separadores de concreto y no se requirieron nuevos tanques adicionales a los existentes en la fase uno.
- Dividir la recirculación de lodos activados a la primera etapa (DeOx/DeNit) y a la tercera etapa (anóxica/aerobia) permite tener un mejor control de la demanda de oxígeno y el nitrato residual que entra a la zona anaerobia. Esto también permite parcialmente la eliminación del proceso competitivo de remoción de nitrógeno y fósforo.
- La zona anóxica/aerobia está equipada con difusores y mezcladores mecánicos para que sea operado como un reactor aerobio o anóxico. Cuando se prefiere el modo anóxico para maximizar la nitrificación, esta zona puede ser aireada si se requiere para incrementar el tiempo de retención de sólidos bajo condiciones de frío extremo para asegurar una completa nitrificación.
- Se incluyeron las instalaciones necesarias para dosificar sosa cáustica al influente y al digester aerobio para el control del pH.
- Se incluyeron las instalaciones necesarias para dosificar cloruro férrico justo aguas arriba del tanque de membranas para disminuir las concentraciones de fósforo del efluente para satisfacer los límites de fósforo total y al digester aerobio para minimizar el regreso de fósforo soluble en el concentrado.

El sistema fue diseñado para un tiempo de retención hidráulica de 10.4 horas y una edad de lodos de 16 días a una temperatura mínima de 14°C. Los lodos activados recirculados están establecidos para cuatro veces el gasto y se dividen a razón de dos a uno entre la zona de DeOx/DeNit y la zona anóxica/aerobia. El diseño del sistema permite desechar los lodos desde la superficie del tanque de aireación para minimizar la acumulación de espumas y escoria en el biorreactor. La planta también tiene la opción de desechar lodos directamente por la línea de recirculación. Las dos maneras de desechar lodos son medidas mediante medidores de flujo magnéticos y son registrados mediante el sistema de control de la planta.

La expansión de la planta también incluyó un espesador de lodos de membrana de marca ZeeWeed para espesar los lodos desechados de una concentración de alrededor de 8,000 a 10,000 [mg/L] hasta altas concentraciones de alrededor de 30,000 a 40,000 [mg/L] antes de mandarlos al digestor aerobio. Los lodos aerobiamente digeridos son deshidratados utilizando una centrífuga, donde alcanzan hasta un porcentaje de 19 a 22% de su peso original, el agua producto de este proceso es regresada a la primera etapa del tratamiento biológico (zona DeOx/Denit).

Características de las membranas

Como se ha mencionado, la separación de sólidos se logra mediante membranas de fibra hueca ZeeWeed 500, de las cuales se incluyeron un total de 88 cassettes en la fase dos con las siguientes especificaciones:

- Material: Fluoruro de polivinilideno
- Tamaño de poro nominal: 0.04 micras
- Propiedades de la superficie: no iónica e hidrofílica
- Diámetro de fibras: 1.9 mm diámetro externo / 0.8 mm diámetro interno
- Dirección del flujo: de afuera hacia adentro
- Rango de presión transmembrana para agua residual: -55 a 55 kPa
- Rango de presión transmembrana para agua para consumo humano: -90 a 90 kPa
- Temperatura máxima de operación: 40°C (104°F)

Los módulos que se incluyeron tienen unas dimensiones de 2,198 mm de alto, 844 mm de ancho y 44 mm de espesor (Ver Figura 2.17).



Figura 2.17 –Membranas empleadas en Cauley Creek. (GE, 2008)

Manejo de lodos

Como se mencionó con anterioridad en el capítulo, el manejo de sólidos en la planta de Cauley Creek incluye un espesador de lodos de membrana, almacenamiento aireado de lodos, deshidratación de lodos mediante una centrífuga y posteriormente su disposición final.



La parte clave del manejo en la planta de Cauley Creek fue el espesador de lodos ZeeWeed, el cual tiene la misma configuración y un funcionamiento prácticamente igual al proceso de BRM. El espesamiento de los lodos implica llenar el tanque de membranas con los lodos desechados del tratamiento biológico. Cuando el tanque se llena, se arranca la bomba de permeado y los lodos de desecho son bombeados al espesador a la misma tasa que se saca el permeado del sistema. La separación de sólidos y líquidos es mediante las membranas las cuales son directamente sumergidas en los lodos. Las membranas están conectadas con el lado de succión de la bomba de permeado, la cual aplica un vacío y permite la extracción de agua de los lodos mediante los poros de la membrana y excluyendo los sólidos. La aeración del tanque de las membranas permite que el tanque esté completamente mezclado y asegura que los sólidos estén uniformemente distribuidos a través del tanque. Durante el proceso, los sólidos en el tanque de membranas son concentrados mientras que se remueve el permeado. El sistema opera de esta manera hasta llegar a la concentración deseada de sólidos. A partir de ese punto, se detiene la bomba que alimenta al sistema de lodos y la bomba del permeado, mientras que los lodos espesados se transfieren de tanque.

La planta de Cauley Creek empleó el ya mencionado espesador de lodos para minimizar el volumen del digestor aerobio y las capacidades de los equipos aguas abajo de este. Este espesador de lodos ZeeWeed tiene la capacidad diseñada para soportar un flujo de lodos desechados de 379 metros cúbicos por día con concentraciones de 10,000 mg/L de SST y producir aproximadamente 95 metros cúbicos por día con concentraciones de 40,000 mg/L de SST. Dichos lodos son llevados a un digestor aerobio en donde mediante procesos de oxidización y descomposición de materia orgánica por microorganismos en la presencia de oxígeno producen un producto estable, reduciendo la masa, el volumen y los organismos patógenos.

Desinfección

En un sistema de tratamiento de aguas, la desinfección es considerada el principal mecanismo para la destrucción o inactivación de microorganismos patógenos para prevenir enfermedades a los usuarios y daño al ambiente. Es de suma importancia que el agua residual sea tratada adecuadamente antes de su desinfección para que cualquier desinfectante sea efectivo.

Un sistema de luz ultravioleta transfiere energía electromagnética de una lámpara de mercurio hacia el material genético de un microorganismo (como el ADN). Cuando la radiación ultravioleta penetra la pared celular de un microorganismo, destruye la habilidad de la célula para reproducirse. Dicha radiación es generada por una descarga eléctrica a través de vapor de mercurio.

La efectividad de un sistema de luz ultravioleta depende de las características del agua residual a tratar, de la intensidad de la radiación ultravioleta, de la cantidad de tiempo que los microorganismos son expuestos a la radiación UV y de la configuración del reactor. Para cualquier planta de tratamiento, el éxito de la desinfección está directamente relacionado con la concentración de coloides y partículas constituyentes del agua residual.

La longitud de onda óptima para desactivar microorganismos de manera efectiva está dentro del rango de 250 a 270 nm. La intensidad de radiación emitida por la lámpara se disipa conforme la distancia de la lámpara se incrementa. Medidas estándares de lámparas de baja presión son 0.75 a 1.5 metros con 1.5 a 2 centímetros de diámetro. La temperatura ideal de las paredes de la lámpara está entre 35 y 50 grados Celsius.

El tratamiento terciario que se empleó en la planta de Cauley Creek fue precisamente desinfección mediante luz ultravioleta con una configuración de reactor de contacto y lámparas ubicadas perpendiculares al flujo (Ver Figura 2.18). Algunas de las principales ventajas de la desinfección con luz ultravioleta son que es efectiva desactivando la mayoría de virus y quistes, es un proceso físico lo que elimina el manejar y almacenar sustancias químicas tóxicas o corrosivas y no produce ningún efecto residual que sea dañino para la vida acuática o humana. Entre sus principales desventajas se encuentran que es inefectiva en dosis bajas, es un método de desinfección relativamente caro que necesita de mantenimiento constante, no funciona adecuadamente para aguas con alto contenido de sólidos suspendidos y turbiedad y usualmente se necesita agregar cloro residual en el caso de redes de distribución. Finalmente, es importante mencionar que la desinfección es un proceso redundante de suma importancia que proporciona la garantía de que el agua tratada estará completamente desinfectada, haciéndoles llegar a los usuarios agua con la calidad adecuada que no ponga en riesgo su salud.

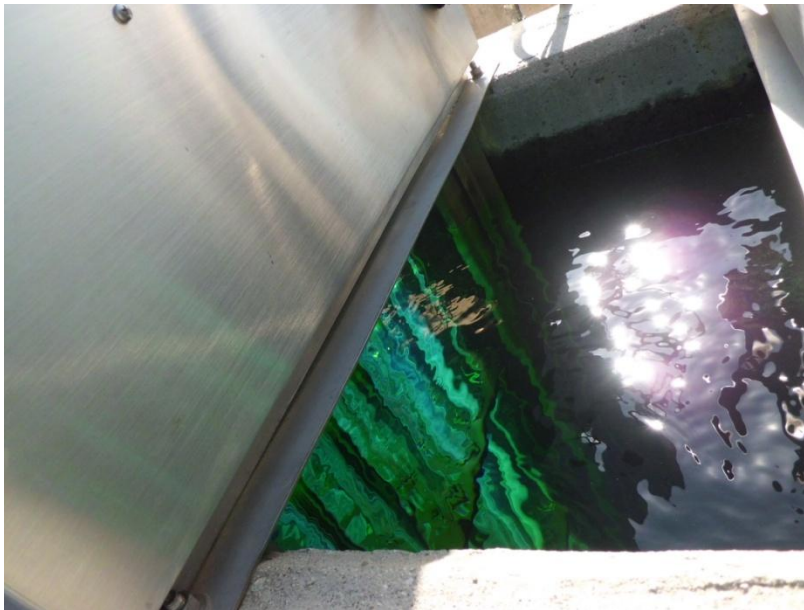


Figura 2.18 – Sistema de desinfección de Cauley Creek.

Reutilización y reúso

Debido al efluente de muy alta calidad que produce la planta de Cauley Creek, su reutilización es empleada en diversas aplicaciones. Las principales aplicaciones son para riego donde usuarios como

escuelas, campos de golf, iglesias y otros particulares aprovechan el agua tratada. También se tiene un aprovechamiento considerable en el mismo sitio, en donde se riegan mediante aspersores o por goteo, campos con una superficie total un poco superior a las 36 hectáreas (ver Figura 2.19). En estos campos se cultiva y se cosecha heno. Para la distribución del agua tratada se tuvo que implementar una red especialmente para agua tratada, lo cual generó un importante precedente para que fomentara la reutilización del agua.



Figura 2.19 – Superficie de riego en sitio.

2.3 Construcción de la planta de tratamiento de Cauley Creek

Después de realizar la adecuada planeación y diseño, la siguiente etapa es la construcción del proyecto. Cuando se construye un proyecto de gran impacto social y ambiental como una planta de tratamiento, se tiene que recurrir a algunas actividades realizadas en la etapa de planeación. Entre las actividades más importantes se encuentran: el programa de obra, el presupuesto y el programa de control de calidad. El programa de obra consiste principalmente en emplear herramientas como la ruta crítica para que sea posible decir cuándo se realizarán las actividades y cuándo tienen que terminar para que la obra se termine en el tiempo estipulado en la planeación. El presupuesto le sirve al constructor para que los costos de material, herramienta y mano de obra se mantengan en lo estipulado en la planeación y el concurso de la obra. Finalmente, el programa de control de calidad ayuda a que se pueda asegurar que los materiales y estructuras producto de la construcción tengan una calidad aceptable conforme a las especificaciones requeridas. Con ayuda de estas herramientas el constructor es capaz de cumplir con el principal objetivo de la construcción, que es la ejecución del proyecto en calidad, costo y tiempo.

Los procedimientos constructivos no siempre son los mismos y dependen completamente del constructor y los requerimientos de la obra, pero normalmente se puede seguir la siguiente secuencia



de pasos para realizar la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales con características similares a la de Cauley Creek:

- 1) Limpieza y despalle del terreno natural
- 2) Trazo y nivelación del terreno
- 3) Construcción de los caminos e instalaciones provisionales
- 4) Cimentación
- 5) Construcción de reactores e infraestructura del proceso de tratamiento
- 6) Habilitar y montar los equipos e instrumentación requerida
- 7) Construcción de instalaciones auxiliares (oficinas, laboratorios, etc.)
- 8) Instalación de servicios públicos
- 9) Construcción para control de acceso y seguridad

El primer paso consiste en remover la capa superficial del terreno que contiene materia vegetal y quitar basura, escombros, desperdicios orgánicos o cualquier material que pueda contaminar o impedir el correcto funcionamiento de las estructuras. La maquinaria empleada usualmente consiste en bulldozer o motoconformadora para obras de gran magnitud. El siguiente paso consiste en apoyarnos de herramientas topográficas para localizar el predio y situar y alinear su perímetro trazando una poligonal de acuerdo con el uso del suelo y dimensiones correspondientes que a su vez tienen que coincidir con lo establecido en el título de la propiedad. Dependiendo de la magnitud de la obra se utilizan tránsito, teodolitos o brújulas para medir ángulos, cinta métrica, odómetro y distanciómetro para medir distancias, y para medir la pendiente se emplea el nivel de mano, de riel o automático.

El paso tres es esencial para poder continuar con los trabajos subsecuentes de la obra y se refiere a que es necesario construir las instalaciones necesarias para contar con las condiciones de seguridad e higiene del personal técnico y obreros. Estas instalaciones pueden ser: oficinas, almacenes, sanitarios portátiles, áreas de trabajo, suministro de servicios, accesos entre otros. Otro aspecto clave del paso tres son los caminos de acceso; en la mayoría de ocasiones las obras civiles se realizan en lugares remotos y altamente irregulares por lo que se requiere hacer caminos de acceso para transportar personal, material y herramientas. Dichos caminos varían en longitud dependiendo de la obra y pueden ser desde pequeñas rampas para el paso de máquinas hasta varios kilómetros de distancia. El siguiente paso abarca toda la subestructura de la obra y es de vital importancia porque fenómenos como deformaciones en el suelo (asentamientos) o sismos, pueden afectar la superestructura de manera significativa. La cimentación a elegir depende completamente de las características del suelo en donde se construya pero en general pueden ser superficiales (zapatas aisladas y corridas), compensadas (cajón de cimentación) o profundas (pilotes o pilas) y cada una tiene su procedimiento constructivo en particular. La maquinaria empleada también depende de la cimentación elegida pero usualmente consiste en retroexcavadoras, grúas, taladros, camiones de carga, entre otros.

El paso siguiente es la construcción de la parte principal de la planta, la infraestructura en donde se realizan los procesos biológicos y químicos que hacen posible separar los contaminantes del agua. En la planta de Cauley Creek, dicha infraestructura se construyó en su mayoría con concreto reforzado o

estructura metálica. La parte del tratamiento biológico y desinfección se construyó de concreto reforzado, teniendo los volúmenes indicados en la Tabla 2.6, mientras que los tanques con las membranas y otros equipos se colocaron bajo una estructura metálica. Para construir cualquier estructura de concreto reforzado, es necesario tener los cuidados necesarios que requieren los materiales, en el caso del concreto tiene que ser colado, curado y cumplir con los parámetros de resistencia impuestos por organismos reguladores, y en el caso del acero de refuerzo se tiene que proteger de agentes climáticos dañinos para el material y también asegurarnos que sus parámetros de resistencia cumplan con las especificaciones del proyecto. Usualmente se empieza con el habilitado de la cimbra, cuidando que ésta sea resistente a las cargas que va a soportar, rígidas para que puedan conservar su forma, de fácil armado y colocación, impermeable para impedir que se filtre el concreto y contar con la calidad para dar un acabado aceptable. Se continúa la construcción con el habilitado del acero de refuerzo, en donde se tiene que supervisar que se estén cumpliendo las especificaciones del proyecto y que el material este en buenas condiciones para que funcione correctamente. Posterior al habilitado del acero de refuerzo, se realiza el colado, vibrado y curado del concreto teniendo en cuenta todos los cuidados necesarios con aspectos climáticos y funcionales. Finalmente, cuando el concreto alcanza su resistencia mínima, se puede descimbrar y empezar con el siguiente paso. Los equipos e instrumentación requeridos en una planta de tratamiento son básicamente las bombas, membranas, diversos sensores, sopladores, difusores, entre otros y su colocación, manejo y cuidados dependen completamente de lo que indique el fabricante. En la Figura 2.20 se pueden observar los reactores construidos operando en la planta de Cauley Creek.



Figura 2.20 – Reactores biológicos en operación de la planta de Cauley Creek.

Tabla 2.6 – Volúmenes de los reactores de la planta de Cauley Creek

Tanque	No. de tanques	Volumen total	Porcentaje de volumen total
DeOx/Denit	4	1,082	13.2



Anaerobio	4	1,286	15.6
Anóxica/Aerobia	4	954	11.6
Aerobio 1	4	1968	24.0
Aerobio 2	4	1968	24.0
Membranas	8	954	11.6

(Dodson, 2008)

Las instalaciones auxiliares son aquellas que permiten que el personal realice trabajos necesarios para que la planta opere de forma adecuada. Las instalaciones son oficinas, sanitarios, laboratorios y almacenes principalmente. Hasta aquí toda la parte funcional de la planta prácticamente está terminada, pero para poderla poner en operación es necesaria la instalación de los servicios públicos que requiere; usualmente los únicos servicios públicos que requiere una planta son energía eléctrica, agua potable, drenaje sanitario y servicios telefónicos. Finalmente, para asegurar que la planta tiene una seguridad adecuada se requiere que se construya un control de acceso que normalmente consiste en casetas de seguridad o simplemente una barda perimetral, así como tener las hojas de seguridad de los materiales, botiquín de primeros auxilios y señalización, si es que se requiere.

2.4 Operación de la planta de tratamiento de Cauley Creek

Para poder operar adecuadamente una planta de estas características, es necesario tener en cuenta algunos aspectos fundamentales que se abordarán en esta sección.

Antes que nada, toda planta de tratamiento tiene la obligación de tener en sitio un manual de operación y mantenimiento que contenga toda la información necesaria para operar y mantener apropiadamente los sistemas de recolección, tratamiento y disposición, de acuerdo con las normas y regulaciones vigentes. También es indispensable contar con personal debidamente capacitado para que pueda realizar todas las actividades de operación y mantenimiento que se requieren a través de la vida útil de la planta de tratamiento.

Es importante mencionar que la planta está completamente automatizada y opera mediante un sistema SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) integrado, el cual incluye pantallas de control y monitoreo que en conjunto con una serie de controladores se conectan a una estación central de monitoreo ubicada en la planta. También se dispone dos estaciones remotas, una en la estación de bombeo que alimenta los colectores de la planta y otra en el dormitorio del operador de la planta. Dichas estaciones funcionan vía conexión por modem y que tienen la capacidad de monitorear y controlar los sistemas vitales de la planta de tratamiento de manera remota.

La operación del sistema de pretratamiento es prácticamente automática, ya que dispone de avanzados sistemas automatizados de limpieza y únicamente es necesario el monitoreo periódico para observar



que los sistemas estén funcionando adecuadamente y tengan un rendimiento aceptable. Se tiene que tener en cuenta que el sistema de pretratamiento no requiere tener un flujo mínimo, sin embargo, puede llegar a tener algunas fallas si es que se excede el flujo máximo. En cuanto al mantenimiento sólo requieren de limpieza manual eventual.

En el caso del subsistema de tratamiento biológico es preciso considerar diversos aspectos operativos de la planta, en especial la operación bajo condiciones de temperatura desfavorable y la limpieza de las membranas de ultrafiltración. Después de un adecuado pretratamiento que protege a las membranas contra problemas de ensuciamiento y taponamiento, es necesario mantener los niveles de agua y de oxígeno que los diversos reactores requieren, mediante las estaciones de control. El reto se presenta cuando algún reactor y/o algún cassette de membranas requieren de cierta limpieza o mantenimiento periódico programado. Para este tipo de casos, el diseño de la planta cuenta con cuatro trenes de tratamiento lo cual le da una holgura importante al operador ya que en los meses de lluvias y poca demanda de agua tratada se puede poner uno de estos trenes fuera de servicio para realizar las actividades de mantenimiento necesarias, sin comprometer la producción de agua tratada diaria requerida.

La superficie de las membranas se limpia con dos métodos principales para el taponamiento reversible, aireación y el retrolavado. A través de la superficie de la membrana viajan burbujas de aire y limpian sus fibras removiendo los sólidos adheridos. En intervalos de tiempo predeterminados (cada 12 minutos), se pone en marcha el retrolavado, que consiste en revertir el flujo del efluente durante 45 segundos, para remover partículas que estén obstruyendo algún poro durante la operación de la membrana (Ver Figura 2.21).

Para el taponamiento irreversible se procede a realizar una limpieza de mantenimiento de membranas, un lavado de recuperación y un retrolavado químico. El retrolavado químico es empleado para remover depósitos de la superficie de la membrana y para que se tenga un mayor tiempo entre los métodos de lavado más agresivos, como el lavado químico del sistema o la limpieza de recuperación de la membrana. La limpieza mediante el retrolavado químico se realiza bombeando permeado con cloro a través de las membranas a una baja presión y alto flujo. Se recomienda una dosis de hipoclorito de sodio (Cl_2) de 2.5 [mg/L] y un flux de aproximadamente 35 [L/m²d] para este tipo de limpieza. Algunas especificaciones que el fabricante proporciona para la limpieza de los módulos ZeeWeed se presentan en la Tabla 2.7

Tabla 2.7 – Parámetros para la limpieza de las membranas ZeeWeed

Parámetro	Límites
Temperatura máxima	40[°C]
Rango de pH	2.0-10.5

Concentración máxima de Cl_2	1000 [ppm]
---------------------------------------	------------

(GE, 2008)

La limpieza de mantenimiento de membranas es utilizada para sostener un flux más alto y también incrementar la frecuencia entre la limpieza de recuperación. Se tiene programada una limpieza de hipoclorito de sodio y de ácido cítrico tres y una vez a la semana respectivamente. La limpieza de mantenimiento consiste en detener la producción de permeado y se alterna entre retrolavado con una solución química a un flux de aproximadamente $20 \text{ [L/m}^2\text{d]}$ por 30 segundos y después relajando las membranas por 5 minutos. Este procedimiento se repite 10 veces antes de aerear el tren para ponerlo de vuelta en servicio.

Durante la limpieza de recuperación, los cassettes de la membrana se sumergen en una solución de hipoclorito de sodio de 18 a 24 horas y posteriormente en una solución de ácido cítrico por otras 18 a 24 horas. Este tipo de limpiezas se realizan cada seis meses o en caso de que la presión transmembrana tenga un incremento importante. Se emplean sustancias químicas adicionales como sosa cáustica y metabisulfito de sodio para neutralizar el ácido cítrico y el hipoclorito de sodio entre limpiezas, respectivamente.

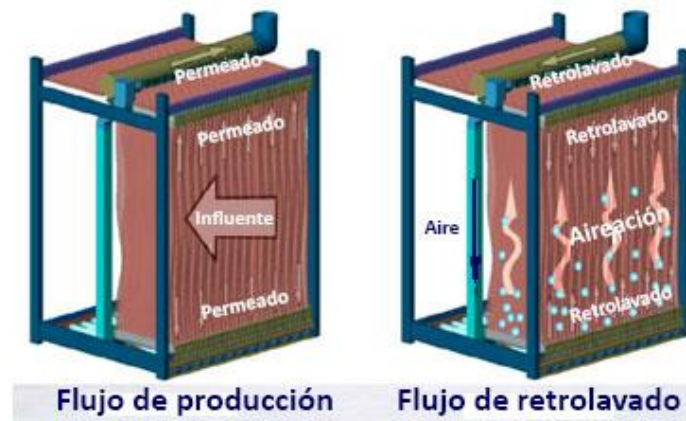


Figura 2.21 – Retrolavado de las membranas ZeeWeed. (Peeters, 2008)

Otro aspecto importante que se tiene que abordar en el tratamiento biológico es la operación en condiciones de temperatura desfavorables. Utilizando microorganismos provenientes de aguas residuales municipales, que encontramos en un reactor biológico, para que la planta tenga un funcionamiento óptimo se requiere un ámbito de temperatura ente 30 y $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (Stein, 2010), debido a que por encima de $35 \text{ }^\circ\text{C}$ los flóculos se empiezan a deteriorar, perdiendo eficiencia en la sedimentación y separación de sólidos y líquidos; pero los problemas de temperatura más comunes en la planta de Cauley Creek son los debidos a temperaturas bajas durante el invierno. Bajo condiciones de temperatura baja la actividad biológica disminuye y a temperaturas por debajo de $5 \text{ }^\circ\text{C}$ la actividad biológica tiende a ser prácticamente nula, por lo que se requiere mantener a través de todo el año la temperatura por



encima de los 10 °C en todos los procesos biológicos. Para lograr las temperaturas deseadas, el operador tiene las alternativas que se describen en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 – Alternativas de operación para condiciones de temperaturas bajas

Alternativa	Acción de operación
Incrementar la temperatura del agua residual	<ol style="list-style-type: none">1. Controlar la pérdida de calor<ul style="list-style-type: none">• No utilizar aireadores de superficie• Aislamiento de reactores• Emplear aireación mediante difusores• Instalar cubiertas para reactores• Eliminación de filtros percoladores2. Calentar los reactores<ul style="list-style-type: none">• Inyección de vapor a los reactores• Agregar agua caliente al reactor
Incrementar la actividad biológica en los reactores	<ul style="list-style-type: none">• Incrementar la velocidad de reacción agregando nutrientes• Incrementar sólidos suspendidos del licor mezclado con mezclado intenso y mayor exposición de microorganismos previniendo la sedimentación de sólidos en el fondo de los reactores
Reducción en las descargas de lodos en exceso	<ul style="list-style-type: none">• Adicionar carbón activado en polvo para que se pueda absorber materia orgánica en vez de degradarse en el sistema (la cual puede ser removida posteriormente con un correcto manejo de lodos) permitiendo una reducción de la carga en el sistema biológico.• Incrementar las dosis de coagulantes, propiciando la salida de más carga orgánica del reactor y reduciendo así la carga al sistema biológico para una operación más consistente.• Contener las descargas de lodos para que la materia orgánica se pueda reciclar hasta que se tenga una temperatura adecuada de operación.

Dependiendo de la calidad del agua, del sistema y su utilización, el mantenimiento de las lámparas de luz ultravioleta puede variar. Sin embargo, todo sistema de desinfección que utiliza luz ultravioleta necesita de limpiezas periódicas y/o de reemplazos de lámparas que no tengan el funcionamiento o rendimiento adecuado. La operación del sistema de desinfección consiste básicamente en que la luz tiene que tener cierto tiempo de contacto con el agua tratada para asegurar una desinfección adecuada. Los únicos factores que afectan este proceso son un medidor de flujo, con el que se controla la cantidad



de agua que entra al sistema y de esta forma se proporciona el tiempo de contacto recomendado, y sensores de intensidad de luz para el control del amperaje del sistema.

Las estructuras son muy importantes para que la planta conserve un buen rendimiento y operación, sin embargo, en pocas plantas se da atención al mantenimiento constante y preventivo después de su construcción. Es necesario que el operador de la planta, acompañado del manual de operación y mantenimiento, tenga la capacidad de identificar y reparar daños en las estructuras para evitar su deterioro. Esto lo puede realizar mediante procedimientos establecidos en el manual de operación y mantenimiento que engloba: procedimientos para limpieza, vaciado y llenado de tanques, reparación de geomembranas y grietas en el concreto, identificación y reparación de fugas en tuberías, procedimientos para renivelar reactores y reponer recubrimientos para la protección del concreto, entre otros. Cabe mencionar que el operador también tiene la obligación de establecer protocolos de las acciones que deben ser tomadas en caso de algún desastre natural o accidente.

Aspectos de seguridad en la operación y mantenimiento

Un objetivo fundamental durante la construcción y operación de plantas de tratamiento es la disminución del riesgo de accidentes. Para lograr este objetivo, tienen que participar los trabajadores y operadores, la parte administrativa de la planta y el diseño con énfasis en la seguridad. La seguridad en la operación se refiere a todas las acciones que deben realizar tanto los operadores como los trabajadores de la planta al realizar un trabajo, la gestión de la seguridad es la parte de la administración que ayuda a mantener un control de la salud del personal así como la promoción de una cultura de seguridad hacia los trabajadores y, finalmente, la seguridad en el diseño son las actividades enfocadas a la prevención de accidentes desde la concepción de la planta. Algunas de las principales acciones necesarias para reducir los riesgos de accidentes en la construcción y operación se enlistan a continuación:

- Seguridad en el diseño: Instalación de barreras protectoras y barandales, casetas de control altamente protegidas, controladores vía remota y equipos auxiliares de monitoreo, colocar sopladores en lugares con aislación de sonido y con buena ventilación.
- Seguridad en la operación: portar equipo de protección personal (casco, respiradores, guantes, arnés, ropa y calzado de seguridad, entre otros), mantener un área de trabajo limpia y ordenada para minimizar peligros, asegurarse que el cableado y equipo eléctrico son seguros antes de utilizar, revisar la calidad del aire antes de entrar a espacios confinados, asistir a programas de capacitación continuamente, conocer las medidas de seguridad correspondientes al trabajo que se necesite realizar.
- Gestión de seguridad: Exámenes médicos periódicos a los trabajadores para asegurar que no muestren síntomas de alergias o efectos crónicos por su contacto con agentes biológicos, mantener las hojas de seguridad de los materiales a la mano, proveer la capacitación necesaria a los trabajadores.



CAPÍTULO 3 – PROYECTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CIUDAD UNIVERSITARIA, DF MÉXICO

A lo largo de este capítulo se realizará una descripción de las diferentes etapas necesarias para que el proyecto de la planta de tratamiento de aguas residuales de Cerro del Agua pudiera operar satisfactoriamente. El lector se dará cuenta de las diferencias en ubicación geográfica, uso del agua tratada, normatividad, organismos reguladores y medio socioeconómico entre los dos proyectos. Estas diferencias juegan un papel importante para la elección de los diferentes subsistemas que constituyen al sistema de tratamiento. Una ventaja muy importante es que en esta planta también se utiliza actualmente un sistema BRM, lo que permite ampliar los conocimientos acerca de estos sistemas y de esta manera complementar el análisis de su funcionamiento.

3.1 Planeación de la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria

La planeación de la planta de tratamiento de aguas residuales de Cerro del Agua (PTARCA) inició a partir de los años sesentas debido a la inexistencia de plantas de tratamiento en la zona y dada la demanda de aguas tratadas para riego. Se diseñó y construyó en los años setentas y empezó a operar satisfactoriamente en 1982.

Justificación y objetivos del proyecto

Los objetivos fundamentales del proyecto son:

- Tratar aguas residuales en CU para el riego de áreas verdes
- Servir de apoyo a la investigación
- Dar servicio y apoyo a la docencia

La planta se ubica en el acceso de la Avenida Cerro del Agua, en Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México DF (Véase Figuras 3.1 y 3.2). La ubicación de la PTARCA se eligió debido a que ese era el lugar con la menor elevación dentro de Ciudad Universitaria, por lo que facilitaría la recolección y bombeo de las aguas residuales.

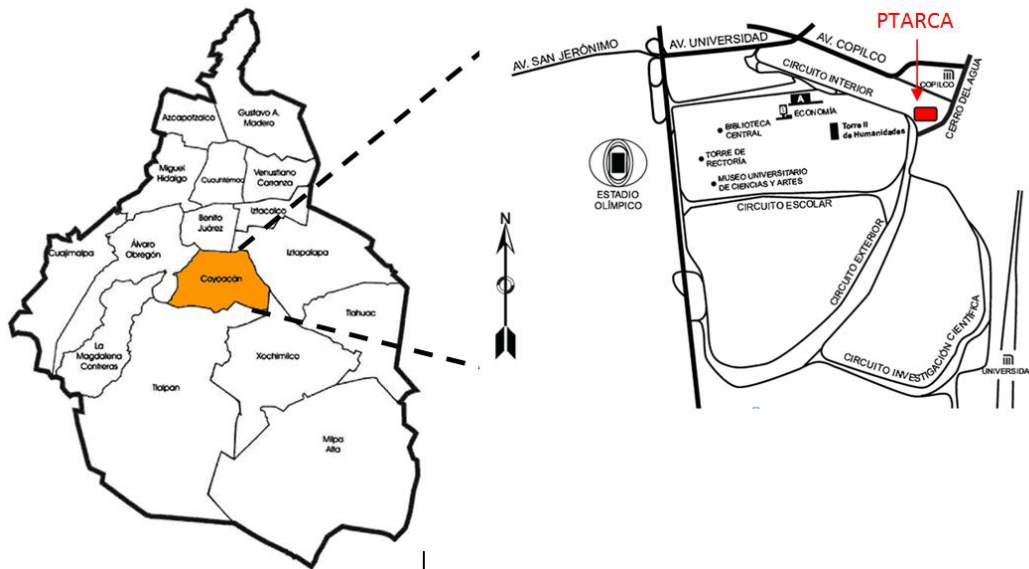


Figura 3.1 – Ubicación PTARCA.



Figura 3.2 – Imagen satelital de la PTARCA. (Google Maps)

Como en la planta de Cauley Creek, el desarrollo del proyecto de la PTARCA también tuvo dos fases, la última con el objetivo de rehabilitar la infraestructura existente y modernizar el sistema de tratamiento de la planta original. En la primera fase se utilizaban tres sistemas de tratamiento: lodos activados convencionales, discos biológicos y filtro percolador. En la segunda fase se optó por eliminar los sistemas de biodiscos y filtro percolador y mantener el sistema de lodos activados, aprovechando la infraestructura existente e incorporando un sistema de membranas. La rehabilitación y modernización fue motivada por el cambio en la calidad del agua, que se produjo al implantar un programa para la instalación de muebles sanitarios ahorradores de agua en las dependencias de CU; la DBO_5 se incrementó de manera considerable y el sistema de tratamiento de la fase uno no podía seguir tratando la misma cantidad de agua residual y cumplir con los requerimientos de calidad de la norma oficial



mexicana. Debido a que los sistemas con BRM producen una mejor calidad de efluente con bajos requerimientos de espacio, se tomó la decisión de implantar este sistema en la PTARCA.

Clima

En la mayoría del territorio del DF, que incluye la zona de interés, el clima es templado subhúmedo, y en el resto del territorio el clima es seco a semiseco y templado húmedo (INEGI). En la Tabla 3.1 se presenta la temperatura mensual promedio del DF con la información disponible de tres estaciones meteorológicas, indicando también la temperatura mensual del año más caluroso y más frío de acuerdo a la información más reciente del INEGI:

Tabla 3.1 - Temperatura media mensual en el Distrito Federal en °C

Estación Concepto	Periodo	Mes												
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Desviación alta al Pedregal	2010	12.1	12.9	15.8	16.9	17.7	18.6	15.9	16.3	16.0	14.8	13.2	12.7	
	De 1962 a													
	Promedio	12.7	13.8	15.9	17.0	17.5	17.3	16.4	16.4	16.2	15.5	13.9	12.8	
	Año más frío a/ Año más caluroso	1974	12.7	13.1	14.6	15.8	17.2	16.2	14.5	15.7	15.3	13.9	12.1	12.7
El Guarda	2008 b/ De 1965 a	8.5	8.6	9.2	9.1	9.3	9.1	8.8	9.0	8.3	9.0	8.8	8.6	
	Promedio	9.1	9.2	10.1	10.4	10.9	10.8	10.5	10.3	10.2	9.9	9.5	9.4	
	Año más frío a/ Año más caluroso	1981	10.0	10.1	10.0	9.4	10.2	8.6	8.8	8.0	7.0	6.7	6.1	6.2
	1995	14.1	14.6	16.5	18.6	19.9	18.5	17.1	17.0	16.7	14.9	14.5	13.1	
Col. San Juan de Aragón	2009 b/ De 1953 a	14.7	16.5	18.2	20.7	20.7	20.1	20.1	19.9	19.1	19.1	15.7	15.3	
	Promedio	12.9	14.6	17.0	18.5	19.2	19.2	18.3	18.4	18.0	16.8	14.8	13.2	
	Año más frío a/ Año más caluroso	1956	9.5	13.3	15.5	17.9	17.5	16.8	17.1	17.5	16.1	14.8	13.1	11.9
	2009	14.7	16.5	18.2	20.7	20.7	20.1	20.1	19.9	19.1	19.1	15.7	15.3	

(INEGI, 2012)

Es relevante para el proyecto conocer la precipitación mensual para determinar cuáles son los meses de mayor demanda de agua tratada, en la Tabla 3.2 y en la Figura 3.3 se presenta la precipitación mensual en milímetros de las tres estaciones que corresponden al Distrito Federal, indicando a su vez los años más secos y más lluviosos de cada estación. Se observa que junio, julio, agosto y septiembre tienen la mayor precipitación, mientras que noviembre, diciembre, enero y febrero la menor. Los meses donde



ocurre la mayor precipitación coinciden con las vacaciones escolares y administrativas y se aprovecha esa circunstancia para dar el mantenimiento necesario a los equipos y a la obra civil, asegurando así un buen funcionamiento de la planta en los meses subsecuentes.

Tabla 3.2 – Precipitación total mensual en milímetros

Estación Concepto	Periodo	Mes												
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Desviación Alta al Pedregal	2010	38.0	101.0	10.3	23.0	120.8	200.4	393.5	239.5	159.5	1.0	1.0	5.2	
	De 1952 a													
	Promedio	11.4	7.1	10.3	25.1	70.4	162.6	216.8	215.2	198.3	79.5	14.8	5.2	
	año más seco	1982	0.0	8.4	5.8	15.4	119.5	124.7	153.0	123.9	58.8	44.3	2.4	3.2
año más lluvioso	1958	109.7	1.5	0.0	3.5	141.5	175.2	229.0	259.0	309.3	86.0	104.0	19.5	
El Guarda	2008 b/ De 1965 a	0.0	3.0	0.0	99.0	36.0	189.0	273.0	233.0	271.0	63.0	0.0	0.0	
	Promedio	14.7	7.7	19.9	51.1	82.2	219.0	267.8	281.9	232.7	91.0	15.6	7.5	
	año más seco	1982	0.0	23.0	6.0	37.0	144.0	189.0	243.0	133.0	78.0	45.0	3.0	0.0
	año más lluvioso	1990	0.0	13.0	83.0	192.0	177.0	389.0	577.0	517.0	475.0	450.0	0.0	0.0
Col. San Juan de Aragón	2009 b/ De 1953 a	8.2	3.1	16.9	5.3	42.9	90.3	90.5	111.8	207.9	63.4	8.0	9.3	
	Promedio	10.2	9.4	11.5	24.9	47.5	102.9	119.1	114.7	95.6	51.0	10.0	5.9	
	año más seco	1957	0.0	6.0	2.0	32.5	44.0	59.0	79.5	38.5	54.5	30.0	11.5	4.0
	año más lluvioso	1991	0.0	198.0	0.0	0.0	67.9	203.0	107.5	70.0	64.4	140.0	1.5	8.3

(INEGI, 2012)

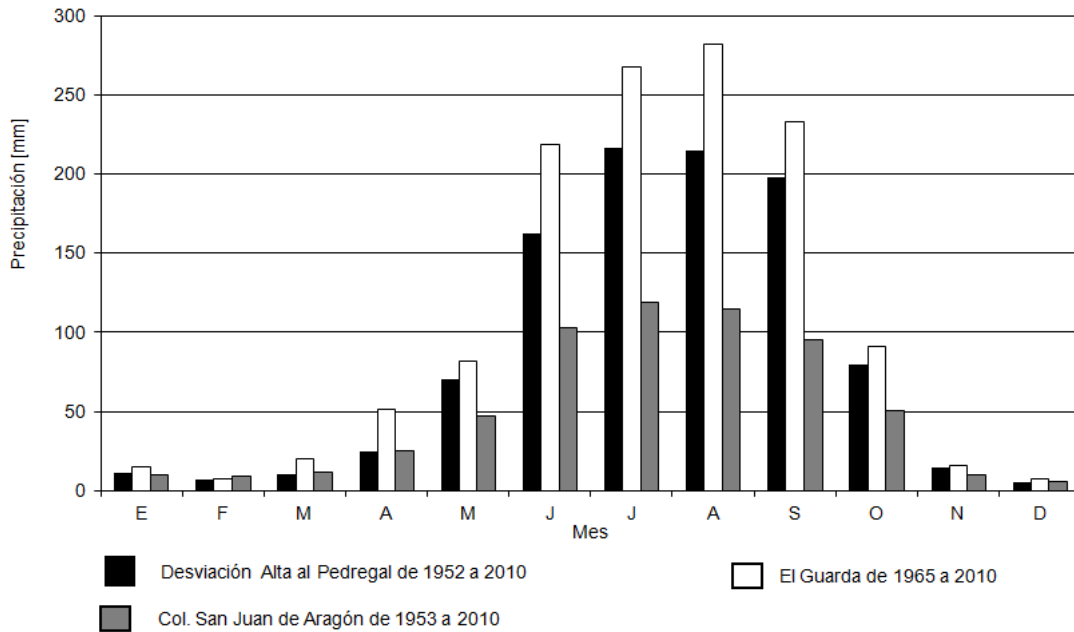


Figura 3.3 – Precipitación promedio mensual del Distrito Federal. (INEGI, 2012)

Hidrología

La zona de estudio pertenece a la Cuenca del Valle de México, en donde casi el 76% del agua de lluvia se evapora y regresa a la atmósfera, el resto escurre por los ríos o arroyos y se infiltra al subsuelo y recarga acuíferos (CONAGUA,2011). En la Figura 3.4, se muestran los diferentes componentes hidrológicos de la región del Valle de México, donde las importaciones de otras cuencas son los metros cúbicos de agua provenientes de los sistemas Cutzamala y Lerma, y las exportaciones a otras cuencas se refiere a los metros cúbicos de agua que llegan al río Pánuco.

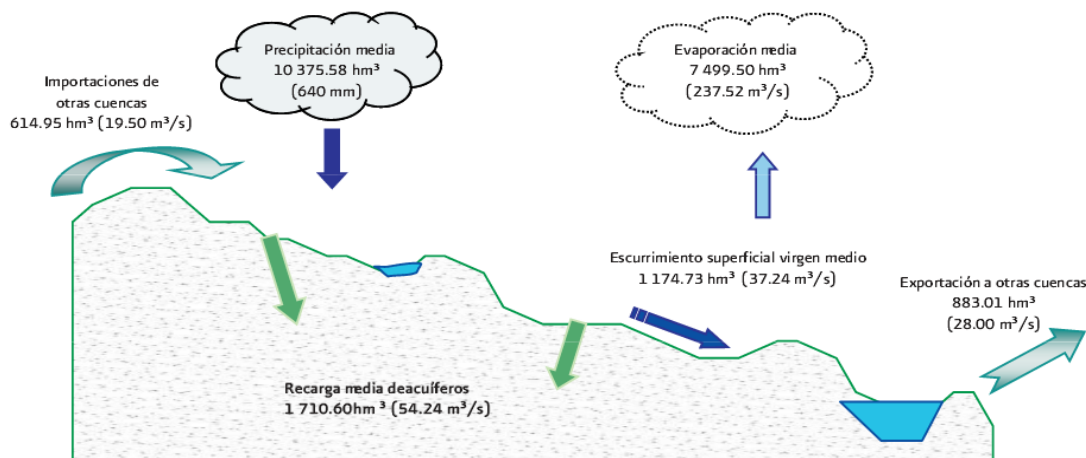


Figura 3.4 – Componentes del ciclo hidrológico de la región del Valle de México. (Comisión Nacional del Agua, 2011)

En la Tabla 3.3 se nombran los principales ríos y otros cuerpos de agua dentro del Distrito Federal.

Tabla 3.3 – Ríos y otros cuerpos de agua en el Distrito Federal

<i>Ríos</i>		<i>Otros cuerpo de Agua</i>		
Entubados	No entubados	Canales	Presas	Lagos
Mixcoac	Agua de Lobo	Chalco	Anzaldo	Xochimilco
Churubusco	Los Remedios	Apatlaco	Mixcoac (canutillo)	San Juan de Aragón
La Piedad	Tacubaya	General		
Consulado	Becerra	Nacional		Chapultepec
	Santo Desierto	Cuemanco		
	La Magdalena	Del Desagüe		
	San Buenaventura			
	El Zorrillo			
	Oxaixtla			

(INEGI, 2012)

Demografía

La población del Distrito Federal de acuerdo a lo que menciona el INEGI es de 8,851,080 habitantes mientras que la población de México es de 112,336,538 habitantes según el censo realizado en el 2010 (INEGI,2012). En la Figura 3.5 se puede observar el crecimiento de la población del Distrito Federal del año 1950 al 2010.

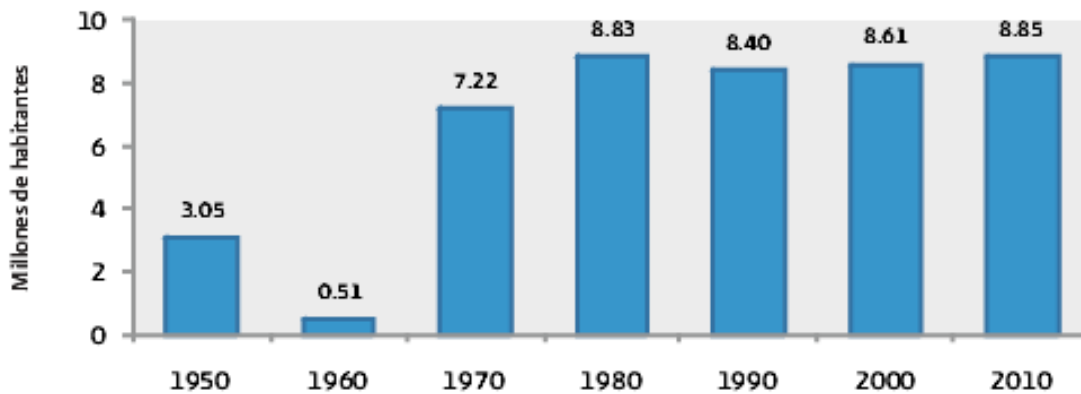


Figura 3.5 – Crecimiento de la población del Distrito Federal 1950-2010. (Comisión Nacional del Agua, 2011)

Ahora, para tener una idea más clara del cambio en la población de Ciudad Universitaria, se observa en la Tabla 3.4 que la población universitaria a nivel de licenciatura del año 2000 al 2010 aumentó de forma considerable con un incremento de 45,000 personas. El constante incremento de la población escolar de



la UNAM del año 2000 en adelante es un posible indicador del aumento de ciertos parámetros de calidad del agua con el tiempo.

Tabla 3.4 – Población Escolar de la UNAM

Año	Licenciatura	Posgrado	Total
1970	61,709	2,930	64,639
1975	109,516	6,635	116,151
1980	136,554	9,245	145,799
1985	135,983	11,282	147,265
1990	135,457	11,916	147,373
1995	137,076	14,205	151,281
2000	134,172	17,270	151,442
2005	150,253	19,765	170,018
2010	179,052	25,036	204,088
2011	180,763	25,167	205,930
2012	187,195	26,169	213,364
2013	190,707	26,878	217,585

(Portal de estadística universitaria, 2000)

Uso de suelo

La mayor porción de usos de suelo que conciernan al área de estudio corresponden a uso habitacional unifamiliar y mixto que se refiere a las colonias circundantes a la planta que en muchas ocasiones también están combinados con los comercios ubicados en la planta baja de unidades habitacionales. La otra porción que corresponde a Ciudad Universitaria, tiene uso de suelo de equipamiento urbano (servicios, administración, salud, educación y cultura) y espacios abiertos.

Medio socioeconómico

En el área circundante a la planta se ubican las colonias Copilco El Alto y Copilco Universidad, que son de uso principalmente habitacional. Las casas habitación y departamentos pueden adquirirse por montos de entre 15,000 a 25,000 pesos por metro cuadrado. El elevado costo de las propiedades se debe principalmente a la alta demanda que genera una excelente ubicación en una zona a sólo unos minutos de la UNAM.

Medidas de mitigación del impacto ambiental

Debido a que en esta planta se consideraron diversas alternativas de diseño, el impacto ambiental y su mitigación fue un factor decisivo para optar por la opción del empleo de un sistema BRM. Una de las medidas de mitigación de impacto ambiental fue el empleo de un arcotecho para cubrir el sistema de BRM, con el cual se protege a las membranas de ultrafiltración de agentes externos, se mitiga la presencia de olores y también se mejora el aspecto estético de la planta, evitando cualquier tipo de

problemas con los vecinos de áreas circundantes. En la Figura 3.6 se muestra una foto de la cubierta del sistema BRM.

La planta emplea sopladores de diferentes capacidades para abastecer de oxígeno al tanque de aireación del sistema biológico y al tanque que contiene las membranas de ultrafiltración. Dichos sopladores son equipo muy ruidoso por lo que también se colocaron en un cuarto con aislamiento acústico y con ventilación para evitar su sobrecalentamiento y asegurar su correcto funcionamiento. Cabe mencionar que el empleo de un sistema BRM desde un inicio produjo ahorros importantes en espacio e inversión, debido a sus ventajas con respecto a los sistemas LAC y por consiguiente ocasionando un menor impacto ambiental.



Figura 3.6 – Cubierta del sistema BRM de la PTARCA.

3.2 Diseño de la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria

Descripción general

El sistema de tratamiento de la PTARCA es bastante sencillo, debido a que para el reúso del agua tratada no es necesaria la remoción de nutrientes. A continuación se enumeran las diferentes fases del proceso de tratamiento:

- Pretratamiento
- Tratamiento biológico o tratamiento secundario
- Desinfección y reúso

En la Figura 3.7 se muestra el diagrama de flujo de la PTARCA.

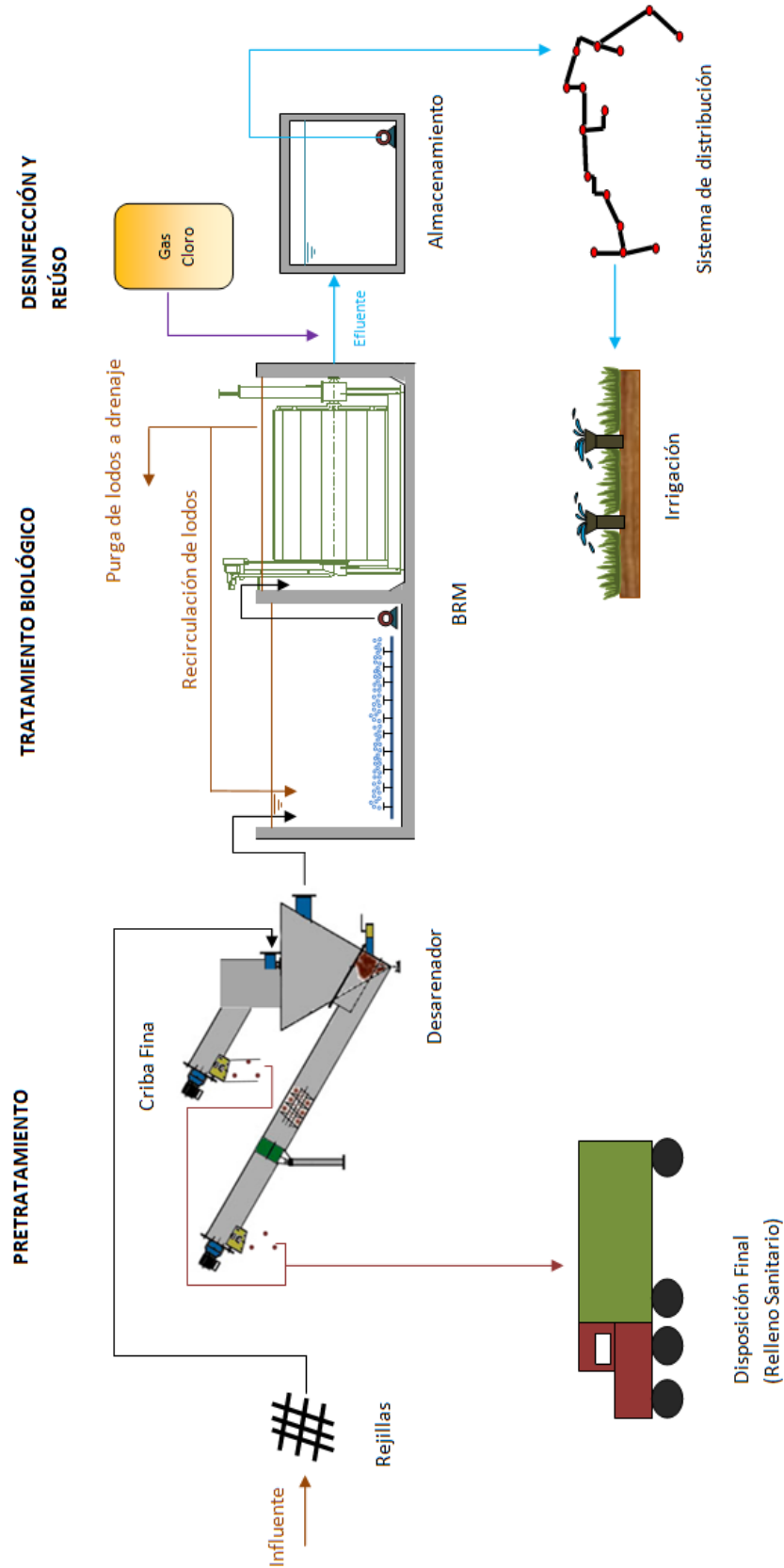


Figura 3.7 – Diagrama de flujo de la PTARCA



El agua residual es recolectada mediante tres colectores, dos ubicados en Ciudad Universitaria y uno en la colonia Copilco El Alto. Estas aguas son almacenadas en un tanque regulador para posteriormente ser bombeadas a la planta de tratamiento.

El agua bombeada llega al pretratamiento, y pasa por una serie de barreras para la remoción de partículas de gran tamaño. La primera barrera consiste en unas rejillas para partículas gruesas, posteriormente una criba fina y finalmente un desarenador de vórtice. Todo esto con la finalidad de que las partículas discretas no dañen equipos o contaminen algún proceso más adelante.

Después del pretratamiento, el agua es conducida hacia el tratamiento secundario, el cual consiste en un reactor biológico seguido de una membrana de ultrafiltración para la separación de sólidos. El objetivo principal de este subsistema es la clarificación del agua y la remoción de sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, bacterias, entre otros contaminantes y partículas disueltas. La membrana es un filtro con separaciones de poro muy pequeñas, que no dejan pasar partículas de cierto tamaño, incluyendo algunas bacterias y microorganismos dañinos para el ser humano, por lo que la calidad del agua que se obtiene de este tratamiento es muy alta.

Finalmente, el agua es llevada hacia unas cisternas de almacenamiento para su desinfección con cloro y posterior reúso exclusivamente para riego de áreas verdes dentro de Ciudad Universitaria.

Pretratamiento

El pretratamiento consta de tres partes: rejillas, cribado fino y un desarenador. La primera parte del subsistema consiste en rejillas de acero con un espaciado de 2 centímetros, dichas rejillas son precisamente las que se habían construido en la fase uno de la planta por lo que fue infraestructura aprovechada, resultando en un ahorro de costos.

La segunda y tercera parte del pretratamiento van juntas en un módulo, diseñado por la compañía Huber, para procesar un flujo máximo de 25 litros por segundo. El módulo consiste en una criba fina, donde se separan sólidos con un tamaño mayor a 3 milímetros y un desarenador de vórtice con 20 años de vida útil esperada. El funcionamiento es bastante simple: el agua cruda llega a la criba donde se remueven los sólidos con tamaños mayores a 3 milímetros, mientras que el agua que atravesó las cribas baja por gravedad hacia el desarenador, un tornillo sinfín con un cepillo limpiador transporta los sólidos mediante un tubo inclinado, deshidratándolos y compactándolos en el camino, para posteriormente lavarlos inyectándoles agua tratada para disminuir su contenido de materia orgánica y finalmente descargarlos en un contenedor para que sean llevados a disposición final.

El siguiente proceso dentro del módulo es el desarenador de vórtice, donde el agua al entrar a un cono de manera tangencial permite que se genere un flujo radial. Posteriormente se le inyecta aire al vórtice generado, y la combinación de la fuerza centrífuga y aireación permite que las partículas proyectadas a la pared sean llevadas al fondo del cono por su propio peso; esta combinación de fenómenos es posible debido a lo que se conoce como el efecto Coanda y el efecto de la "taza de té". Al ser concentradas las arenas en el fondo del cono se remueven mediante otro tornillo sinfín, el cual las transporta hacia la

parte superior con una velocidad controlada para que puedan perder cierta humedad. Para una mejor comprensión del funcionamiento se sugiere que el lector observe la Figura 3.8.

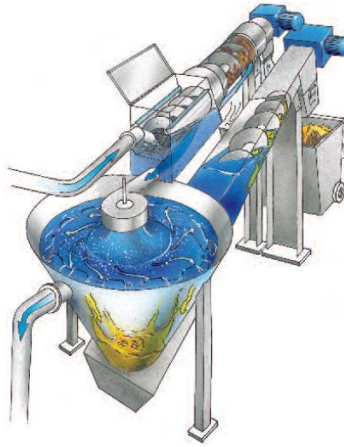


Figura 3.8 – Funcionamiento de pretratamiento. (Hueber Technology, 2011)

Las principales ventajas que presenta este módulo es que se tiene un subsistema completo de pretratamiento en una misma unidad con requerimientos de espacio mínimos y garantizando una excelente separación de sólidos. También cuenta con un sistema para la deshidratación, compactación y lavado de los sólidos producto de las cribas, teniendo una alta eficiencia de remoción. Dicho módulo está construido con acero inoxidable para tener una excelente protección contra la corrosión y también está encapsulado, lo que permite también la eliminación de olores indeseados dentro de la planta y a los alrededores. Otra ventaja del sistema es que se acciona automáticamente controlando la diferencia de niveles para tener un consumo energético eficiente. En caso del taponamiento parcial de la criba, una vez que es superada la caída máxima de presión, se pone en funcionamiento el mecanismo de limpieza para restituir la capacidad de flujo. Cabe mencionar que debido a la tecnología y buen funcionamiento del módulo de pretratamiento, los sólidos y otros desechos generados cumplen con la norma NOM-004-SEMARNAT-2002 ya que sus características no atraen fauna nociva ni vectores no deseados. Se presenta una foto del módulo en la Figura 3.9.



Figura 3.9 – Módulo de pretratamiento. (Hueber Technology, 2011)



Tratamiento biológico

Como se mencionó en la descripción general de este capítulo, el tratamiento biológico tuvo dos fases. Debido a que en el periodo de 2006 al 2008 la DBO_5 prácticamente se duplicó con respecto al periodo 2001-2005 y los sólidos suspendidos totales aumentaron de 110 a 125 mg/L (Informe PUMAGUA, 2008), la planta no podía manejar los cambios en la calidad del agua con la infraestructura instalada, por lo que se modificó el proyecto incorporando un sistema de BRM. En los siguientes párrafos se describen los antecedentes y las condiciones actuales del proyecto.

- Tratamiento biológico o secundario de la fase 1

La PTARCA fue diseñada originalmente con tres procesos de tratamiento secundario, un filtro percolador, un disco biológico y un sistema de lodos activados convencionales. Los tres procesos operaban en forma paralela, dividiendo el gasto de 40 L/s de la siguiente manera: lodos activados 20 L/s, filtro percolador 10 l/s, y biodiscos 10 L/s.

En la fase uno, el tren de tratamiento empieza un pretratamiento constituido por rejillas metálicas gruesas con limpieza manual y un desarenador que tenía la función de tanque de sedimentación. El tratamiento secundario a base de lodos activados consistía en un taque de aireación con un cárcamo de recirculación de lodos, conformando un sistema completamente mezclado y con aireación mecánica sumergida. El tratamiento a base de biodiscos consta de tres etapas, cada disco mantiene microorganismos adheridos para realizar la degradación de la materia orgánica. El tratamiento de filtro percolador está formado por dos cárcamos de bombeo (influyente y efluente) y una unidad de biofiltro; en este caso los microorganismos se encuentran en el biofiltro y el agua del influente es rociada por la parte superior del reactor. Cada uno de los tres procesos tiene un sedimentador secundario circular de alimentación central para la separación de sólidos, con recirculación y/o purga de lodos según los requerimientos de cada sistema. La medición del gasto a la entrada de cada proceso se realizaba mediante canales Parshall. El agua clarificada es llevada posteriormente a seis filtros de arena y antracita que funcionan mediante el principio de vasos comunicantes. Finalmente, una parte del efluente es llevada al sistema de dosificación de cloro para formar una solución que posteriormente se una a la corriente principal, logrando una desinfección adecuada del agua tratada. Posteriormente se bombea el agua tratada desinfectada a unas cisternas para que el agua sea utilizada para el riego de áreas verdes de Ciudad Universitaria. En la Figura 3.10 se muestra un diagrama de flujo general de la fase uno de la PTARCA (vista en planta).

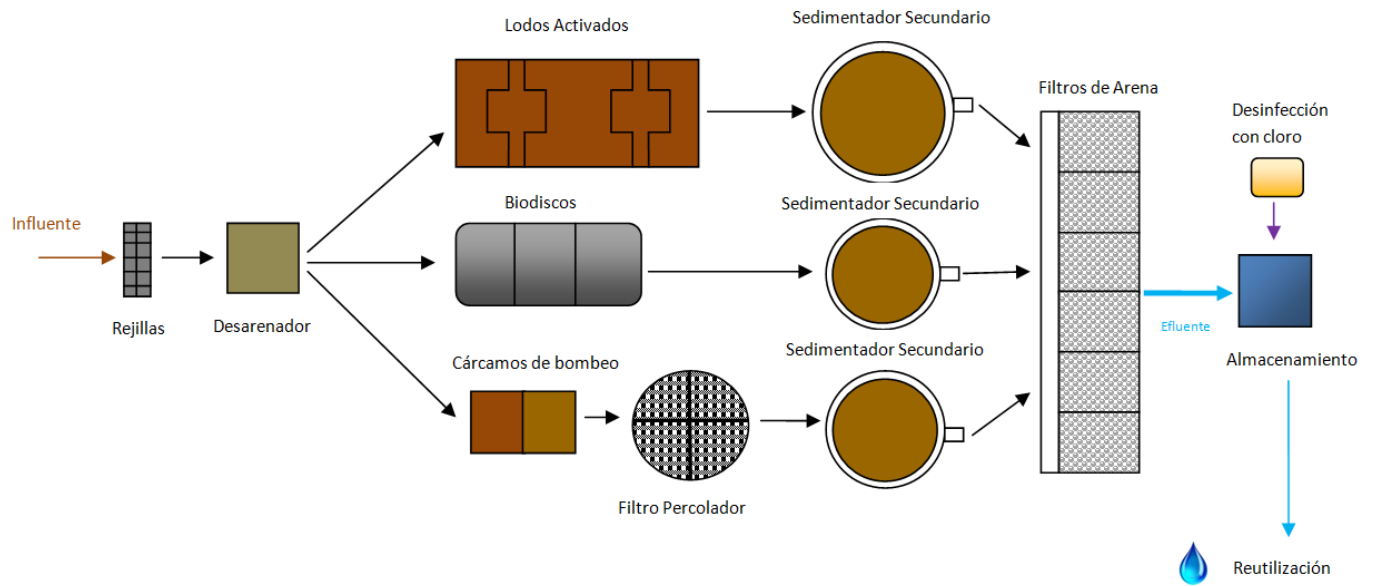


Figura 3.10 – Diagrama de Flujo de la PTARCA fase uno (vista en planta).

- Tratamiento biológico de la fase II

Como se mencionó en la descripción general de la planta, el tratamiento biológico de la fase II consiste en un sistema de lodos activados convencionales de mezcla completa con una membrana de ultrafiltración para la separación de sólidos (BRM), con una capacidad para tratar 25 litros por segundo. El agua residual, libre de sólidos y arena, llega a un tanque de aireación que tiene un volumen total de 385 m^3 y una concentración de sólidos suspendidos totales de 3000 a 3500 mg/L. Los microorganismos presentes en el reactor se encargan de metabolizar materia orgánica para producir compuestos que son fácilmente separables del agua, pero para que estos microorganismos puedan cumplir con su función necesitan de oxígeno (ya que es un proceso aerobio), el cual es suministrado mediante un soplador de lóbulos que transporta el aire a través de difusores de burbuja fina que aseguran una distribución uniforme del aire y mezcla completa del reactor. El licor mezclado es bombeado hacia un reactor anexo de 100 m^3 de capacidad donde se encuentra un sistema de ultrafiltración rotativo a vacío o VRM por sus siglas en inglés. Existe una recirculación de lodos hacia el tanque de aireación para mantener una concentración adecuada en el reactor y una purga que es descargada a la red de alcantarillado del Distrito Federal. Para mejor comprensión del proceso de tratamiento secundario se recomienda ver la Figura 3.11. En la Figura 3.12 se presenta una foto del reactor biológico aerobio instalado actualmente en la PTARCA.

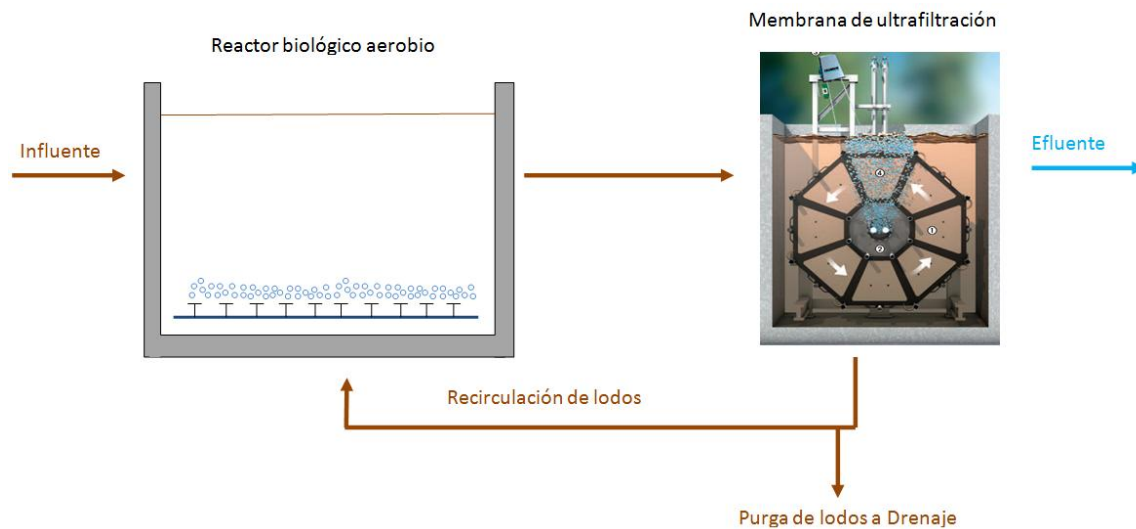


Figura 3.11 – Biorreactor con membrana operando en la PTARCA.



Figura 3.12 –Reactor biológico aerobio operando actualmente en la PTARCA.

Como se ha mencionado a través del presente trabajo, la membrana y el sistema de ultrafiltración es el corazón del sistema BRM por lo que se considera importante mencionar a continuación algunas de sus características y su forma de operación. La membrana, fabricada con un material polimérico, específicamente polietersulfona (PES), está diseñada para eliminar sólidos suspendidos, bacterias y otras partículas en procesos generales de filtración. Tratándose de una membrana de ultrafiltración, cuenta con un tamaño de poro de 38 nanómetros (0.038 micrómetros) y está montada sobre una estructura de acero inoxidable. El sistema tiene una configuración de membrana sumergida externa.

El funcionamiento del sistema se ilustra en la Figura 3.13. El influente llega a la cámara de filtración donde el dispositivo se monta sobre un marco o bastidor. El sistema consiste en un eje hueco sobre el cual se colocan 6 u 8 módulos de ultrafiltración con separaciones predefinidas entre ellos. Posteriormente, el agua es succionada a través de las membranas mediante la aplicación de una presión

diferencial (con un flux pico de aproximadamente 35 [L/m²-h]) para ser descargada mediante tuberías colectoras del permeado. Para evitar disminuciones en el rendimiento de la membrana, se genera un flujo tangencial en su superficie mediante la intrusión de aire. El principio de limpieza de la membrana elimina la necesidad de un retrolavado periódico y consiste en generar un flujo de aire dirigido en la superficie de la membrana y al mismo tiempo se produce una aceleración radial con la rotación de las membranas en el reactor. Ya que únicamente un sector de la membrana necesita limpieza intensa, se consigue un ahorro energético importante.

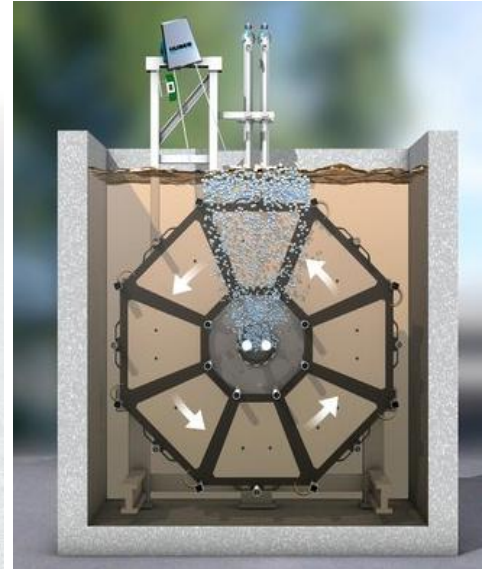
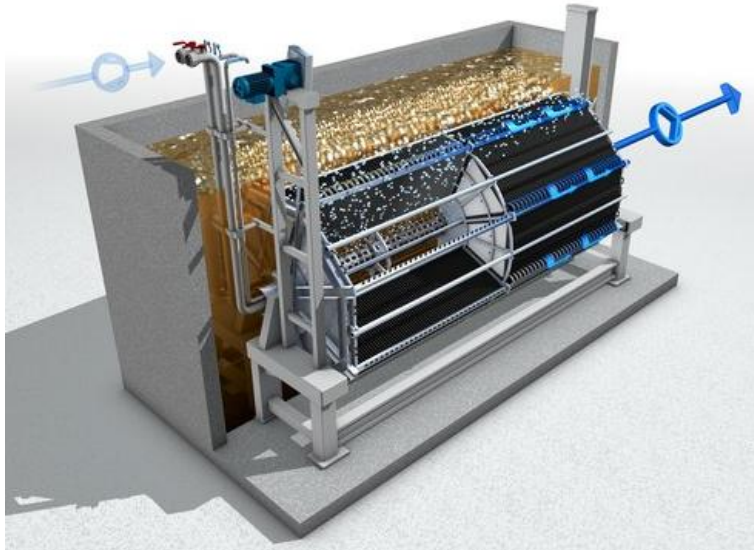


Figura 3.13 – Membrana Huber de ultrafiltración empleada en el sistema BRM de la PTARCA. (Hueber Technology, 2011)

En resumen, el subsistema de tratamiento secundario de la fase uno necesitaba un completo análisis de la concentración viable de la biomasa en el sistema, el aumento de la transferencia de oxígeno con un mejor sistema de aireación y un sistema de separación de sólidos para el tratamiento secundario con menores requerimientos de espacio. Al construir un sistema de reactores biológicos con membranas, fueron satisfechos los tres aspectos mencionados. Con un sistema BRM se puede llegar a altas concentraciones de biomasa y no es tan relevante el tipo de bacterias ni la capacidad de sedimentación de las partículas; se mejoró la transferencia de oxígeno instalando sopladores más eficientes y difusores de burbuja fina asegurando la completa mezcla y aireación del reactor y finalmente, debido a que la separación de sólidos se realiza mediante membranas de ultrafiltración, se ocupa una área muy pequeña con respecto a los sedimentadores secundarios existentes. La capacidad de aprovechamiento de la infraestructura existente y el ahorro energético que se obtiene con el empleo del sistema de ultrafiltración, en combinación con los requerimientos de calidad del agua y espacio disponible, permitieron que se eligiera como sistema de tratamiento un reactor biológico con membranas sumergidas.



Desinfección

Debido a que el pretratamiento y tratamiento secundario no alcanzan a remover el 100% de microorganismos, la mayoría de organismos reguladores demanda la destrucción de organismos patógenos, con el objetivo de prevenir enfermedades transmitidas por el agua y evitar problemas de salud de los usuarios. Es por eso que en la PTARCA después de que el agua es clarificada se transporta hacia unas cisternas para su almacenamiento, dosificando una dosis de gas de cloro de 3 a 4 mg/L antes de que entren al sistema de distribución de agua tratada y sean reutilizadas para el riego de áreas verdes.

Se decidió emplear cloro para la desinfección debido a que a través de los años ha mostrado ser eficiente y capaz de inactivar gérmenes y agentes patógenos, además de ser una opción más económica que otras. La principal ventaja del cloro con respecto a otros métodos de desinfección es el cloro residual que se genera, el cual prolonga la desinfección en el sistema y asegura que el agua va a llegar libre de patógenos al usuario. Es importante mencionar que la efectividad del sistema de desinfección depende ampliamente del pH, que debe ser mayor a 5 y menor a 10 para mayor efectividad. También es pertinente considerar las desventajas de la desinfección con cloro, siendo las más importantes la formación de compuestos peligrosos como los trihalometanos y que el cloro residual es tóxico para ciertas especies acuáticas siendo necesaria la dechloración.

Reutilización y reúso

De la PTARCA el agua tratada y desinfectada se bombea hacia una red de distribución que alimenta a doce cisternas de donde se extrae para el riego de áreas verdes. Las cisternas están ubicadas en los siguientes lugares dentro de ciudad universitaria (Informe PUMAGUA 2008):

- Camellón de química
- Campus central
- Centro médico
- Estadio Olímpico
- Campos de calentamiento
- Campo de beisbol
- Nueva zona deportiva
- Jardín botánico exterior
- Unidad de seminarios
- Tepozán
- Estanque de los peces
- Camellón de veterinaria

La red de agua tratada se extiende por una gran parte de Ciudad Universitaria y con más de 25 años de antigüedad aún sigue satisfaciendo las necesidades agua para riego del campus universitario. El material

y los diámetros de las tuberías varían con respecto a los requerimientos de la red de distribución. En la Figura 3.14 se muestra el trazo de la red de distribución a grandes rasgos.

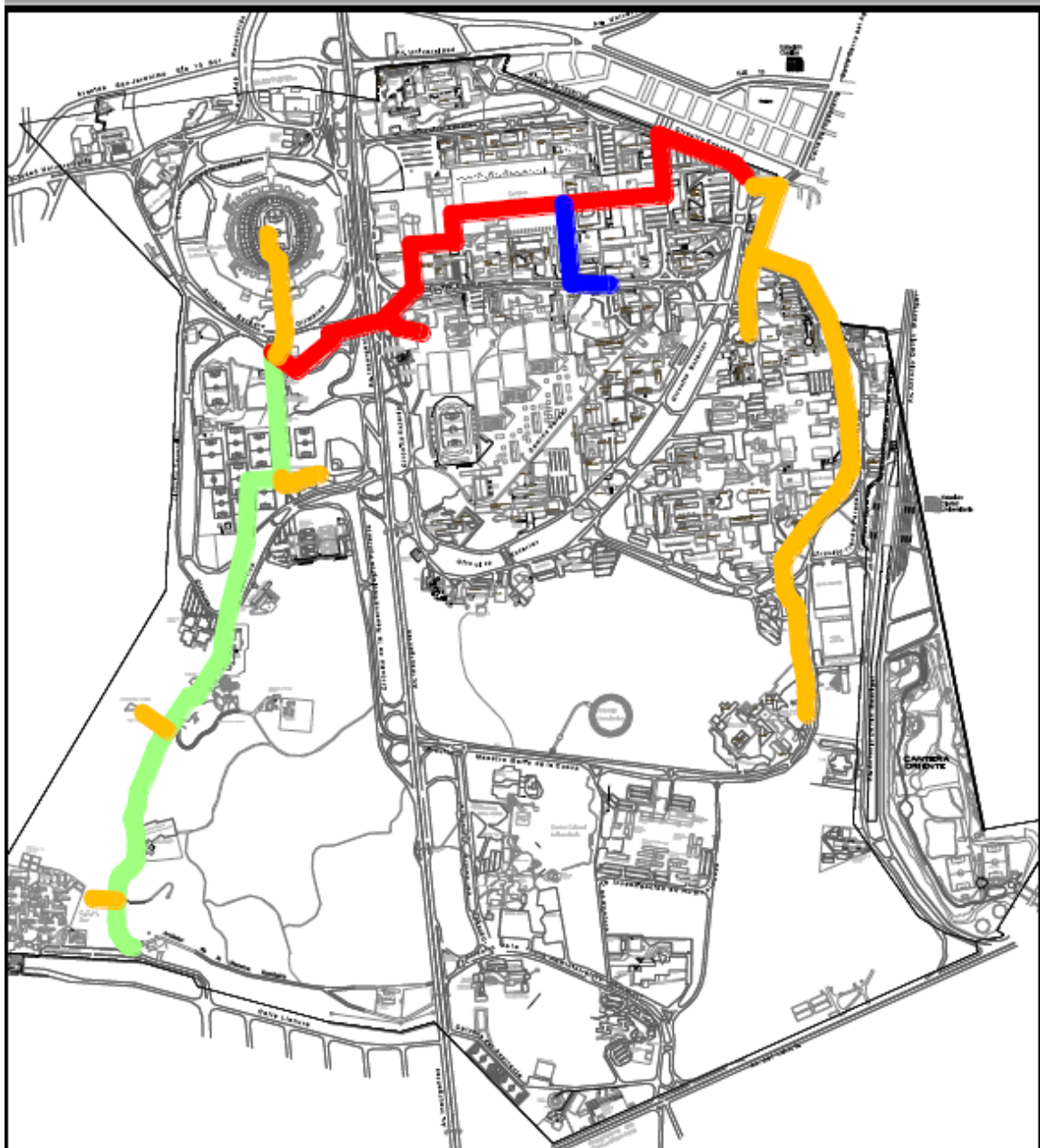


Figura 3.14 – Red de distribución de agua tratada de CU. (PUMAGUA, 2008)

No se remueven nutrientes del agua con el fin de aprovecharlos para el crecimiento vegetal, por lo que los requerimientos que tiene que cumplir el agua tratada únicamente se enfocan en la remoción de microorganismos patógenos, grasas y aceites, DBO_5 , y sólidos suspendidos totales según se indica en la NOM-003-SEMARNAT-1997 titulada “Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas



residuales tratadas que se reúsen en servicios al público”. Dichos límites permisibles se muestran en la Tabla 3.5. En el siguiente capítulo se analiza el cumplimiento de dichos parámetros.

Tabla 3.5 – Límites máximos permisibles de contaminantes

TIPO DE REUSO	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes fecales [NMP/100ml]	Huevos de helminto[huevos/L]	Grasas y aceites [mg/L]	DBO ₅ [mg/L]	SST[mg/L]
Servicios al público con contacto directo	240	1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	1000	5	15	30	30

(SEMARNAT, 2003)

3.3 Construcción de la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria

La construcción de la PTARCA se realizó con procedimientos similares a los descritos en la sección de construcción del capítulo anterior. Sin embargo, como se ha mencionado en puntos anteriores de este capítulo, la PTARCA tuvo un cambio en su infraestructura debido a la calidad del agua y su construcción se realizó en dos fases. La presente sección se enfoca en la segunda fase, es decir, en la renovación de la planta (pretratamiento y tratamiento biológico), donde se incluyen también algunas especificaciones relevantes de los subsistemas modificados de la PTARCA.

- Pretratamiento

Debido a que el pretratamiento consiste en un subsistema prefabricado, lo único necesario fue la construcción de una estructura para alojarlo. Esta estructura, que le brinda estabilidad al subsistema, consiste en una base con material de banco compactado en capas de 20 centímetros al 90% según la prueba proctor, sobre esta base se colocó una plantilla de concreto simple con una resistencia a la compresión de 100 kg/cm² y a su vez esta plantilla sirve como base a la losa de concreto reforzado con una resistencia a la compresión de 200 kg/cm² armada en ambos sentidos con varillas de media pulgada de diámetro a cada 20 centímetros, la cual alberga unas placas de apoyo para el equipo de pretratamiento. Trabajos adicionales consistieron en una rampa de concreto para poder habilitar y



colocar al subsistema de pretratamiento en donde se requería y en un registro pluvial protegido con rejillas.

- Tratamiento biológico

Este subsistema fue el que requirió más cambios, ya que era necesario mejorar el sistema de aireación y subdividir el tanque de lodos activados existente, para crear un nuevo tanque que alojara a las membranas de ultrafiltración. Pero antes de empezar la construcción del cuarto de sopladores y el muro divisor, se tuvieron que realizar algunas actividades de demolición y rehabilitación que se enlistan a continuación:

1. Retiro de la totalidad de láminas de asbesto cemento (cubierta existente del reactor)
2. Demolición de la totalidad de la trabe perimetral y castillos, dejando el nivel de concreto de los tanques existentes
3. Rehabilitación de andador de herrería existente en reactor
4. Retiro de equipos de agitación en reactor (aireadores superficiales existentes)
5. Demolición para las instalaciones requeridas en el muro. Se requirió una instalación de tubería de 12 pulgadas para la recirculación de lodos y otra de 10 pulgadas para la alimentación de aire al reactor, cuidando que los niveles requeridos se satisfagan
6. Retiro de estructura de izaje entre andadores de concreto (empleada para retiro de equipos de agitación existentes)
7. Limpieza y retiro de escombros en interior del reactor.

En la construcción de las casetas de los sopladores, se colocaron zapatas de mampostería en diversas partes de su perímetro, desplantadas sobre una plantilla de concreto de 5 centímetros de espesor y 100 kg/cm² de resistencia como mejoramiento del suelo existente. Las zapatas tienen una geometría de 0.50 por 0.70 metros, las cuales entrarán en contacto con material inerte de relleno (tepetate) que se compactó en capas de 20 centímetros a un 95% de proctor. Las zapatas estarán unidas al muro mediante una cadena de desplante de concreto armado, las cuales están a su vez unidas con una losa corrida de cimentación de 12 centímetros de espesor, reforzada con malla electrosoldada. Los muros fueron construidos de tabique con aplanado en ambas caras y un acabado de pintura vinílica. Se tuvo particular cuidado en que se emplearan ventanas para una adecuada ventilación y una azotea con varios rellenos y drenaje para asegurar su impermeabilidad y evitar cualquier accidente con los equipos que almacena la estructura.

La estructura que engloba el reactor biológico y el tanque de membranas consiste en un arcoteco de lámina el cual forma un arco autosustentante separado con láminas acrílicas reforzadas con fibra de vidrio que usualmente se repliegan para permitir ventilar al reactor. La construcción del reactor no



requirió de una inversión importante ya que se aprovechó la infraestructura existente, incluyendo los andadores y barandales de herrería existentes. Las modificaciones en el reactor consistieron en un muro divisorio nuevo para la separación del tanque de membranas y el reactor biológico, dándole una sobreelevación al tanque de membranas para que se cumpla con el requerimiento del tirante mínimo que necesita la membrana. El muro es de concreto reforzado con una resistencia a la compresión de 250 kg/cm², un tamaño máximo del agregado de $\frac{3}{4}$ de pulgada y de alta resistencia a los sulfatos; se colocaron dos parrillas con varilla de media pulgada a diferentes separaciones y se emplearon bandas ojilladas de PVC para hermetizar las juntas frías del concreto. A continuación se enlistan los pasos de los procesos constructivos empleados para esta renovación:

Proceso constructivo

Trabajos preliminares para la construcción del muro nuevo:

1. Trazar y marcar la ubicación del nuevo muro divisorio
2. Escarificar en losa de fondo y muro 20 cm a cada lado del espesor del muro, y de 5 a 7 cm de profundidad
3. Habilitar el acero de refuerzo según las especificaciones
4. Colocar cimbra y previo al colado aplicar un producto epóxico para la junta de concreto nuevo con concreto viejo, como adhesivo estructura
5. Colar en alturas de cimbra de 1.22 metros de manera que sea más fácil la aplicación del producto epóxico
6. Dejar banda ojillada de PVC como junta de colado para la siguiente etapa
7. Hacer el colado del primer nivel del muro
8. Continuar con los colados hasta tener la altura final. Aplicar producto epóxico en juntas frías de muro nuevo con muro existente
9. Agregar impermeabilizante integral al concreto a razón de 2 kg/m³ de concreto vaciado
10. Para impermeabilización aplicar producto XYPEX PATCH 'N PLUG o similar en amarres de cimbra y en la junta vertical y horizontal del muro nuevo con los elementos existentes (muro y losa). Si el muro existente presentara fisuras o pequeñas oquedades aplicar este mismo producto
11. Para impermeabilización final del tanque aplicar dos manos de XYPEX CONCENTRADO o algún producto similar para garantizar la hermeticidad del tanque



Construcción del muro

1. Trazo y ubicación del paso de muro (medidas, nivel, instalaciones)
2. Demolición de muro de acuerdo las especificaciones correspondientes
3. Preparación de la cimbra a emplear en el paso de muro
4. Aplicación de producto epóxico para la junta de concreto nuevo con viejo
5. Hacer el colado con empleo de Grout como concreto de alta resistencia y expansibilidad

Sobreelevación de muro existente

1. Escarificar en muro existente de 5 a 7 cm de profundidad, hasta descubrir el acero de refuerzo
2. Habilitar el acero de refuerzo según las especificaciones correspondientes
3. Colocación de cimbra y previo al colado aplicar un producto epóxico para junta de concreto nuevo con concreto viejo, como adhesivo estructural
4. Realizar el colado de la sobreelevación del muro hasta nivel de proyecto
5. Agregar impermeabilizante integral al concreto a razón de 2 kg/m³ de concreto vaciado
6. Para impermeabilización final del tanque aplicar dos manos de XYPEX CONCENTRADO o algún producto similar para garantizar la hermeticidad del tanque

Cabe mencionar que debido a que también se colocó una bomba de permealto con mayores dimensiones y capacidad, se tuvieron que construir plantillas de concreto que sirvieran como base para darles estabilidad a los equipos y de cierta forma asegurar su correcto funcionamiento a través de la vida útil de la estructura. Los equipos que necesitaron de esta plantilla fueron la bomba de permealto y los sopladores. La infraestructura para los subsistemas subsecuentes se conservó y actualmente lo que eran los sedimentadores secundarios se utilizan para almacenar agua tratada.

3.4 Operación de la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria

El control de la operación de la PTARCA es llevado a cabo mediante un tablero de control, el cual a su vez tiene una interface de operación (pantalla) donde se dan de alta los parámetros de operación y se elige el tipo de operación que se quiera llevar a cabo (manual, automática, semiautomática). Cada proceso dentro del sistema de la PTARCA tiene un control específico para su correcto funcionamiento, el cual se comentará en los siguientes párrafos. Es importante mencionar que se cuenta con una interfaz de control remoto ubicada dentro del cuarto de control y empleada para el control y estatus operativo



de la planta. Esta interfaz tiene la capacidad de registrar datos del pretratamiento, aireadores, históricos, mediciones de oxígeno disuelto, mediciones de pH, entre otros.

El sistema de pretratamiento tiene una operación automatizada, donde el gasto de operación se controla mediante un medidor de flujo de tipo electromagnético. Cuando existe acumulación de sólidos en la criba existe un tirante diferencial en el agua medido por sensores de nivel (que van de la entrada a la criba) que activan de forma automática el mecanismo de limpieza hasta equilibrar nuevamente el tirante de agua. La manera de operación del tornillo sinfín es regida por un programa previamente fijado donde arranca y se detiene por periodos intermitentes de forma cíclica las 24 horas del día.

La correcta operación del tanque de aireación depende principalmente de los sopladores y los difusores de burbuja fina. Se requiere mantener una adecuada oxigenación del agua para que los microorganismos encargados de descomponer la materia orgánica tengan un medio adecuado para sobrevivir y de esta forma remuevan fácilmente los contaminantes del agua cruda. Actualmente hay dos sopladores funcionando, uno de 50 hp para la aireación del reactor biológico y otro de 20 hp para la limpieza de la membrana, de la cual se hablará más adelante. Por indicaciones del fabricante, el soplador que alimenta al reactor biológico (50 hp) no debe dejar de trabajar a excepción de que no se reciba influente por más de dos horas continuas para lo cual se pueden realizar operaciones discontinuas donde el equipo opera cada diez minutos y reposa 30. Ahora bien, para asegurar que los difusores estén trabajado adecuadamente, los operadores deben verificar de forma visual la superficie del tanque de aireación para asegurarse de que las burbujas se están repartiendo de manera correcta y que no hay burbujas gruesas, lo que indicaría un mal funcionamiento de algún difusor. Un parámetro clave para mantener el oxígeno adecuando dentro del tanque es el oxígeno disuelto, el cual es medido con un sensor. Dicho sensor está conectado al tablero de control y puede cambiar el flujo de aire de los sopladores según se requiera. El fabricante recomienda que el sensor se limpie y se verifique de manera general que ningún componente esté dañado, por lo menos cada 90 días.

Después de oxigenar el agua, se bombea a la cámara de filtración, donde se encuentra una membrana de ultrafiltración. Para bombear el licor mezclado a la cámara de filtración se seleccionó una bomba que en operación normal bombea 5 litros por segundo en promedio, es importante mencionar que el bombeo debe ser permanente para evitar el crecimiento de organismos no deseados en la bomba, sólo se debe suspender el bombeo cuando se le dé mantenimiento a las membranas por taponamiento irreversible (limpieza química). La bomba, que vence un ligero desnivel, también debe proveer el gasto suficiente para que se mantenga un tirante mínimo dentro del tanque de membranas, ya que para que la membrana funcione correctamente necesita de un nivel de inundación mínimo. El nivel mínimo se determina con un medidor de nivel ultrasónico que, en conjunto con el soplador correspondiente, aseguran que la membrana tenga un nivel y una limpieza adecuada. El soplador que se emplea es de 20 hp y se tiene que mantener en operación siempre que exista extracción del permeado, en caso de no producir permeado se puede tener una operación discontinua conforme a lo que especifique el fabricante de la membrana.



La recirculación de lodos se efectúa para mantener una concentración adecuada y cierta estabilidad dentro del reactor biológico, los dos parámetros principales para controlar la recirculación de sólidos son el tiempo de residencia de sólidos y la relación F/M (carga orgánica vs sustrato). El tiempo de residencia de sólidos mínimo tiene que ser aproximadamente de 4.25 horas y una relación de carga orgánica vs sustrato de 0.2 a 0.3 d⁻¹.

Uno de los principales objetivos de los operadores cuando se trabaja con la membrana es que se produzca una cantidad y calidad de agua que cumplan con los requerimientos de los usuarios y los organismos reguladores, respectivamente. Para lograr ese propósito se tiene que tener una concentración de sólidos en el licor mezclado en un rango de 1200 a 2500 mg/L y, en casos extremos, una concentración máxima de 10,000 a 12,000 mg/L; si se rebasa el límite, la membrana no producirá agua con la calidad deseada y/o tendrá mayores problemas de taponamiento con mayor frecuencia. Si la concentración de sólidos se encuentra por debajo de dicho ámbito, se corre el riesgo de que la presión transmembrana aumente de manera considerable, disminuyendo la capacidad de retención de sólidos y con el posible riesgo de ruptura de la membrana. Para el control de fugas de la membrana se tiene un contenedor con glicol, que tiene que mantener un nivel constante, si este nivel se ve afectado significa que el permeado está comprometido al combinarse con licor mezclado. Cuando la limpieza habitual de la membrana no disminuye la presión transmembrana necesaria o mantienen el flux de operación requerido, es necesaria una limpieza química. La limpieza química de la membrana debe llevarse a cabo al menos cada 6 meses según el fabricante, y requiere que se vacíe la cámara de filtración y posteriormente se accione la bomba de permeado de forma inversa para llenar el tanque con agua tratada y sumergir a la membrana. Se pone en marcha el dispositivo que permite que la membrana gire y se acciona el soplador para darle un lavado superficial, después se prepara y agrega una solución química, compuesta principalmente de ácido cítrico o hipoclorito de sodio para su desinfección, para formar una mezcla homogénea (se tiene que mantener por un mínimo de 20 horas) que en combinación con el aire proveniente del soplador harán una limpieza efectiva de la membrana.

Finalmente, la bomba de permeado tiene una función de suma importancia en todo el proceso. También es controlada por el centro de control y su importancia reside en mantener un flujo constante o suspender el flujo de acuerdo a los requerimientos del reactor. Por ejemplo, para mantener el nivel que el tanque de las membranas requiere, se tiene que equilibrar el gasto que entra al tanque con el que sale regulando las bombas de licor mezclado y de permeado, también en caso de que el reactor biológico esté llegando a su capacidad, incrementar el gasto de permeado ayudaría a regularizar el nivel hasta que se pueda regresar a las condiciones normales de operación.



CAPÍTULO 4 – RESULTADOS Y ANÁLISIS

A lo largo de este capítulo, se presentan los resultados de calidad del agua y el análisis de esos resultados de las diferentes fases por las que pasaron los dos proyectos. Para el caso de Cauley Creek, se hace un comparativo con las sustancias químicas empleadas entre la fase uno y dos, así como la calidad del agua promedio que se estaba obteniendo en los últimos años. En el caso de la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria, primero se hace un comparativo entre los tres sistemas de tratamiento previos a la instalación del sistema BRM y posteriormente se comparan los parámetros más relevantes de la calidad del agua obtenida con los tres procesos y con el BRM para comparar su eficiencia de remoción.

4.1. Parámetros de calidad del agua empleados

Cada día se incrementa la demanda de agua, lo que a su vez ocasiona una mayor utilización y por ende una mayor contaminación de este elemento esencial para la vida. Es por eso que para prevenir daños a la salud humana, es necesario determinar la calidad del agua previa a su extracción para consumo o reúso. La calidad del agua depende de las sustancias que contiene, las cuales pueden dividirse en orgánicas e inorgánicas. Sin embargo, dado el extenso número de compuestos naturales y sintéticos que existen, un análisis completo del agua sería impráctico y bastante complejo. Es por eso que en las plantas de tratamiento actuales se emplean métodos rápidos de análisis para considerar grupos de parámetros, en vez de medir únicamente compuestos de forma individual. Aquí es donde parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y sólidos suspendidos totales toman importancia, ya que proporcionan información acerca de la demanda de oxígeno del cuerpo de agua receptor de una descarga, la eficiencia de los procesos de tratamiento, contaminación orgánica, turbiedad y obstrucción de luz, incrementos inesperados de la temperatura, etcétera.

Estos tres parámetros son algunos de los principales indicadores de la calidad del agua y es por eso que se emplearon para evaluar la calidad del agua de los sistemas de tratamiento de la PTARCA. En el caso de la planta de Cauley Creek se presentan los resultados de estos parámetros y adicionalmente se exponen resultados de nutrientes como el fósforo y nitrógeno debido a que parte del efluente descarga en un cuerpo de agua.

4.2. Resultados de calidad del agua de la planta de Cauley Creek

Al terminar la construcción de la fase dos en octubre del 2004, la planta no debía rebasar el límite de fósforo total de 0.13 mg/L en la descarga para inicios de noviembre. La adición de cloruro férrico era inevitable inicialmente, para cumplir con el límite impuesto posterior a la construcción de la planta, por lo que la dosificación de este reactivo fue disminuyendo mientras el proceso biológico se fue estabilizando. En la Figuras 4.1a y 4.1b se puede ver la confiabilidad del sistema con el promedio mensual del fósforo total del influente y efluente de enero del 2005 a abril del 2008, y el nitrógeno del influente de octubre de 2004 a octubre del 2006.

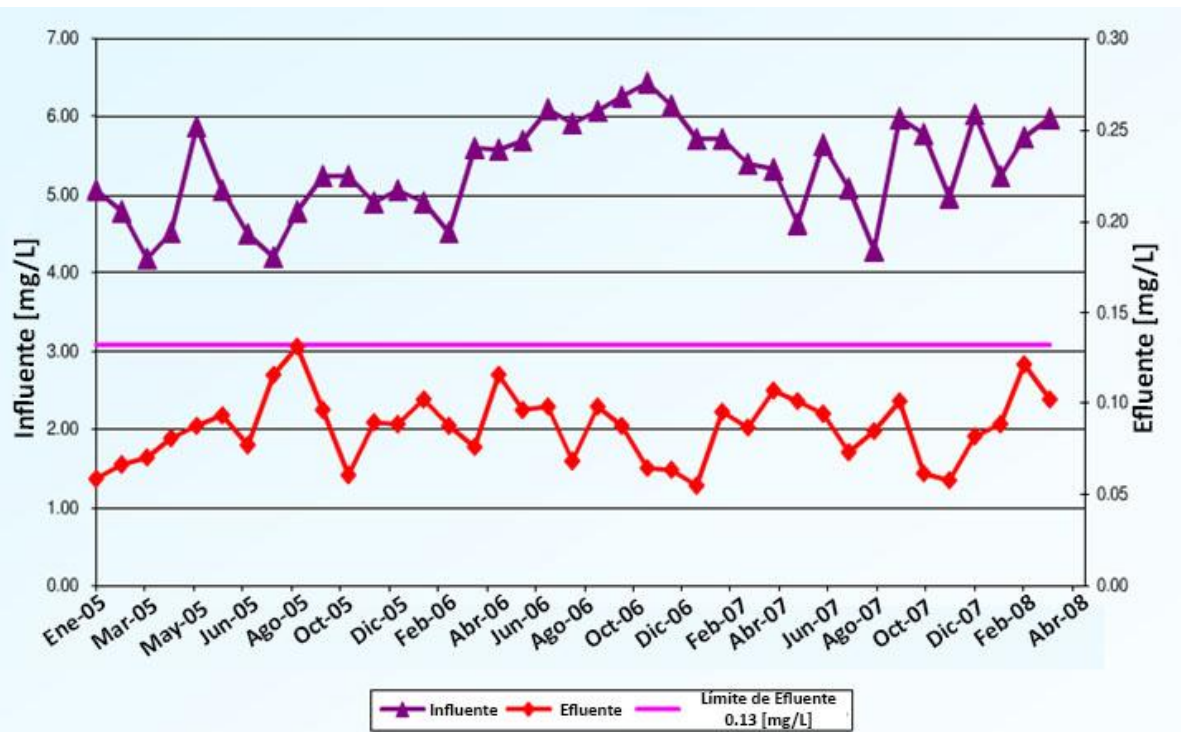


Figura 4.1a – Promedio mensual del fósforo total del influente y efluente de la planta de Cauley Creek. (Dodson, 2008)

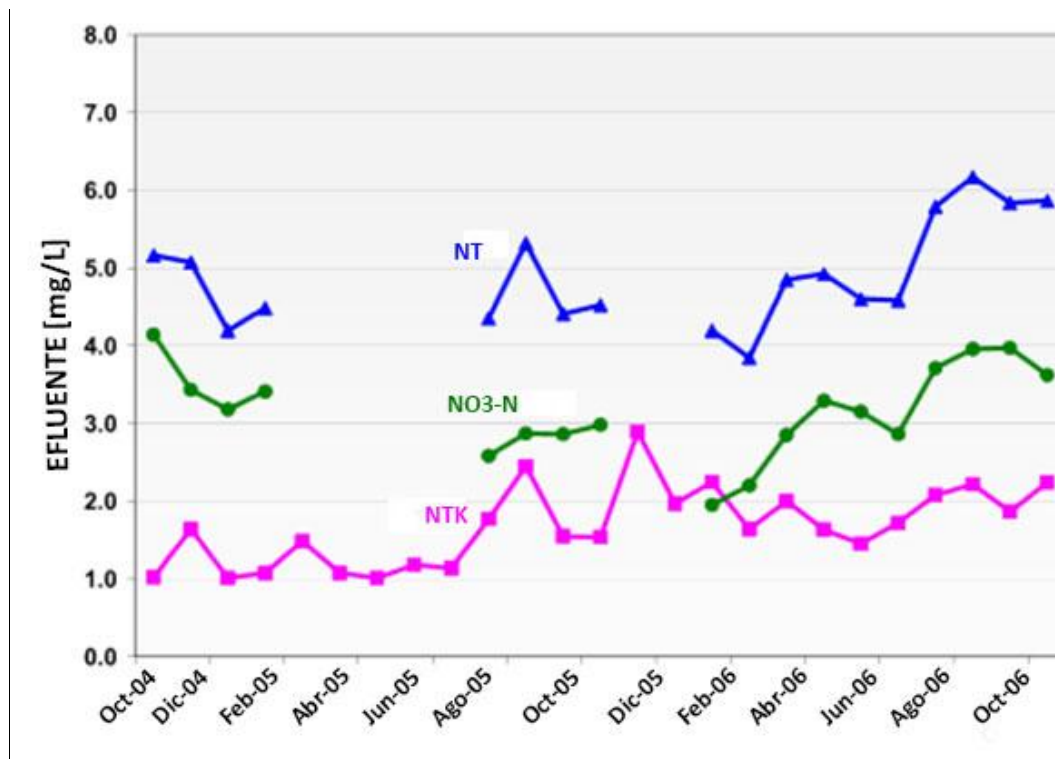


Figura 4.1b – Promedio mensual del nitrógeno del efluente de la planta de Cauley Creek. (Peeters, 2008)



En la Tabla 4.1 se presentan los parámetros promedio de influente y efluente recientes, junto con los valores de diseño que se utilizaron en las simulaciones del programa BioWin. Los datos mostraron que las concentraciones actuales promedio son aproximadamente de 25 a 30% más bajas que los valores de diseño. Estos resultados eran los esperados ya que los valores de diseño se basaron en las concentraciones máximas estimadas (caso más desfavorable) y no en concentraciones promedio.

Tabla 4.1 – Resultados de remoción del sistema BRM de Cauley Creek

Parámetro [mg/L]	Influente de diseño	Influente actual	Efluente actual	Límites del Efluente
Demanda química de oxígeno	570	394	12	-
DBO ₅	220	164	<2	<2.9
Sólidos suspendidos totales	225	166	<2	<5
Nitrógeno total kjeldahl	43	33	1.74	-
Amoniaco	32	25	0.22	<0.5
Fósforo total	7.5	5.2	0.09	<13
Alcalinidad (CaCO ₃)	130	152	54	-

(Dodson, 2008)

Mientras que el objetivo principal de la planta era cumplir todos los límites de descarga regulatorios, la conversión a un tratamiento biológico mejorado con BRM era lograr ahorros en los costos de operación, específicamente en la utilización de sustancias químicas. En la Figura 4.2 se muestra una comparación entre el uso de sustancias químicas durante la primera fase (cuando se utilizaba la adición química significativa en el tratamiento biológico para la remoción de fósforo), las sustancias químicas estimadas por el programa BioWin para las condiciones de diseño y el uso actual de las sustancias químicas a través de dos años. Como observación adicional se puede mencionar que el uso de sustancias químicas para cada caso es el uso total basado en todos los puntos de dosificación, incluyendo lo agregado al digestor y las sustancias químicas analizadas fueron cloruro férrico y sosa cáustica.

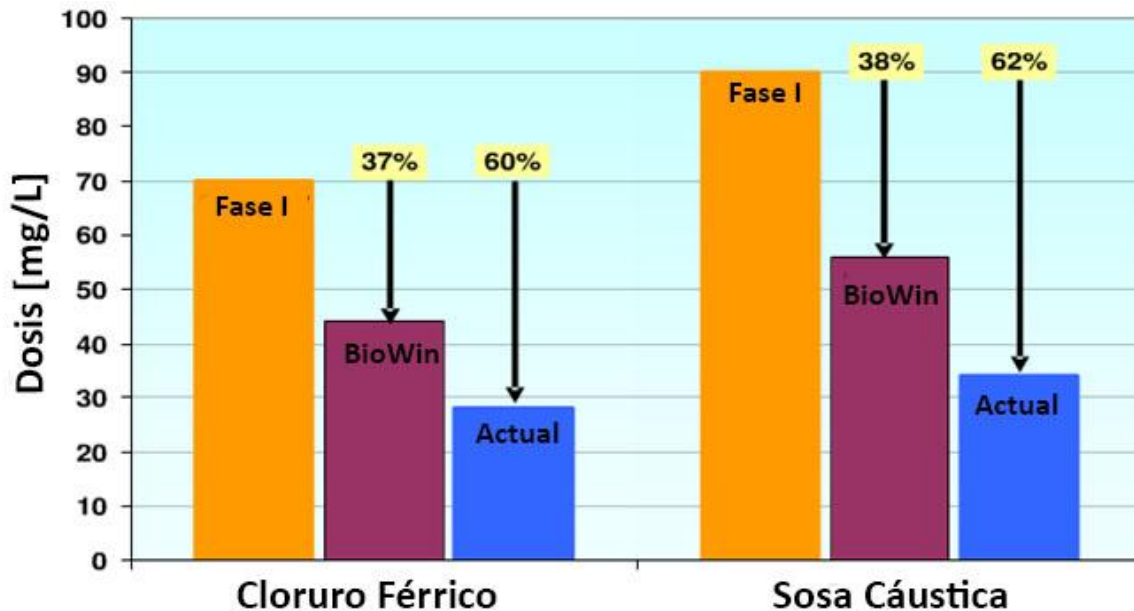


Figura 4.2 – Comparación en el uso de cloruro férrico y sosa cáustica. (Dodson, 2008)

Durante la primera fase, cuando no se había mejorado el tratamiento biológico, se utilizaban cloruro férrico y sosa cáustica a razón de 70 y 90 mg/L respectivamente. En las simulaciones con BioWin del proceso biológico mejorado utilizando valores de diseño del influente se estimaron dosis de 44 mg/L de cloruro férrico y 56 mg/L de sosa cáustica para cumplir con los límites establecidos de descarga. Estos valores fueron significativamente más bajos que los que se estaban empleando en la fase uno y fue una de las razones principales para mejorar el tratamiento biológico en la ampliación de la planta. Las dosis actuales de cloruro férrico y sosa cáustica son en promedio de 28 mg/L y 34 mg/L respectivamente. Esto corresponde a una reducción del 60% con respecto a la fase uno y 30% con respecto a las estimaciones de las simulaciones del programa BioWin basado en los valores de influente de diseño. Nuevamente estos resultados eran esperados debido a que las concentraciones del influente fueron del 25 al 30% más bajas que los valores de diseño utilizados en el programa BioWin.

Debido a sus buenos resultados, la planta de Cauley Creek no ha tenido ninguna violación de los permisos regulatorios en 10 años de operación. Se notó que los flujos del influente tienen un impacto relevante en el proceso, debido a que la planta de Cauley Creek pertenece al sistema del Condado de Fulton sus flujos no son constantes. El diseño en el tiempo de retención de sólidos de 16 días ha sido bastante efectivo como punto de partida, pero varía con los flujos y épocas del año. Se observó que durante algunos meses se empleó un tiempo de retención de sólidos de 13 a 16 días para flujos menores a 15,150 m³/d y para flujos mayores a éste se debe incrementar el tiempo a un ámbito de 16 a 18 días.

Un factor clave fue la alcalinidad del efluente, ya que dos problemáticas importantes fueron el mantener el pH en el proceso biológico mayor a 6.5 y en el efluente mayor a 6 con una dosificación de 54 mg/L de CaCO₃. El rendimiento de la planta mostró que una dosificación de 80 mg/L de CaCO₃ y un pH del

efluente mayor a 6.5 mejoraba la remoción de fósforo total y a su vez mantenía un tiempo de retención de sólidos deseado. La planta actualmente está empleando menos sosa cáustica para el control de la alcalinidad y pH tratando 19,000 m³/d que cuando sólo se trataban 9,500 m³/d.

4.3. Resultados de calidad del agua de la planta de CU

Resultados de los procesos anteriores al proyecto, influente y efluente

En esta sección se presentan mediante gráficas los resultados de los gastos anuales, la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno y los sólidos suspendidos totales de los tres subsistemas de tratamiento biológico (lodos activados, biodisco y filtro rociador) con los que estaba operando la PTARCA antes del sistema BRM. También se incluyen los resultados correspondientes al influente y efluente total de la PTARCA con los subsistemas ya mencionados. Es importante mencionar que los resultados que se presentan se obtuvieron con la información disponible.

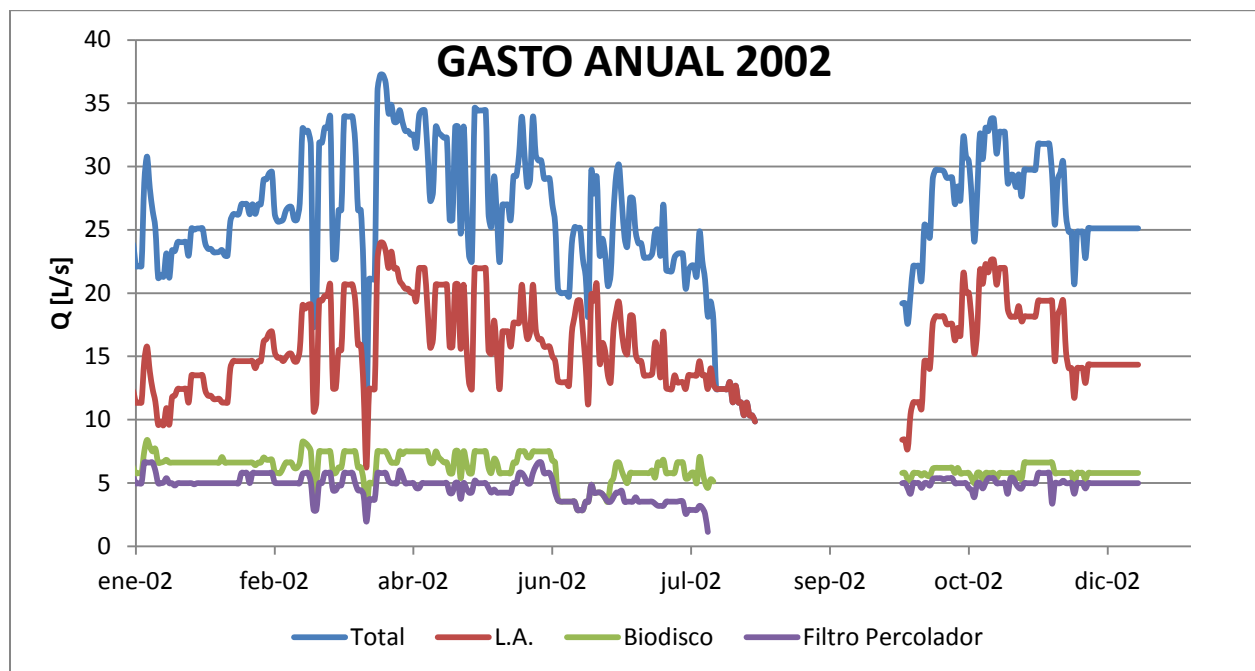


Figura 4.3 – Gastos anuales de cada sistema de tratamiento de la PTARCA, año 2002

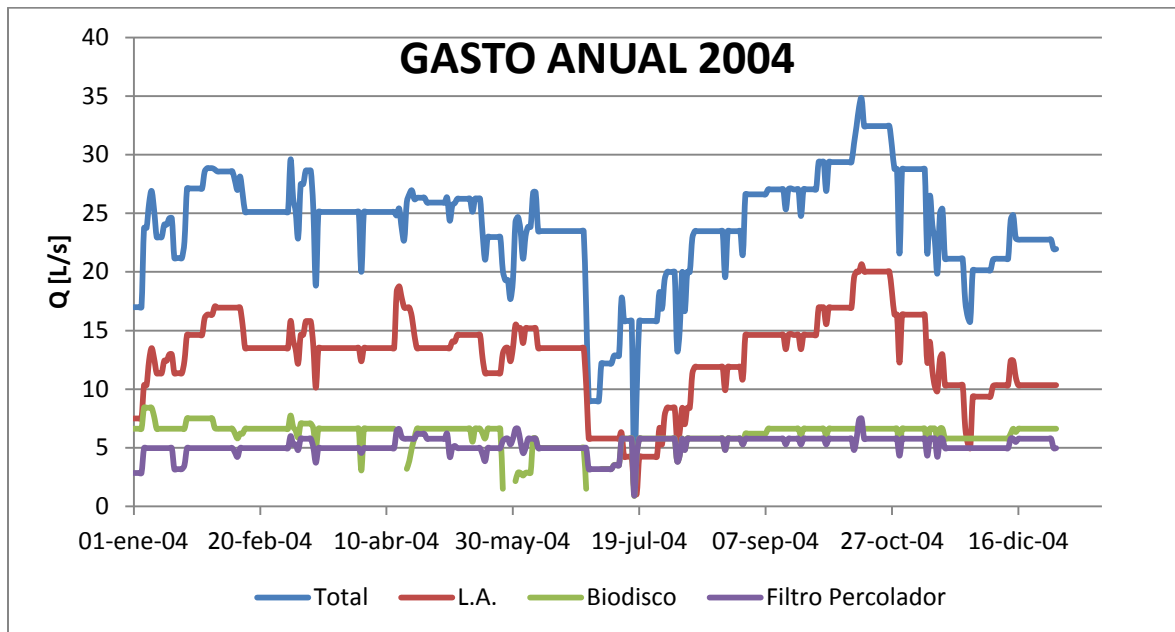


Figura 4.4 -- Gastos anuales de cada sistema de tratamiento de la PTARCA, año 2004

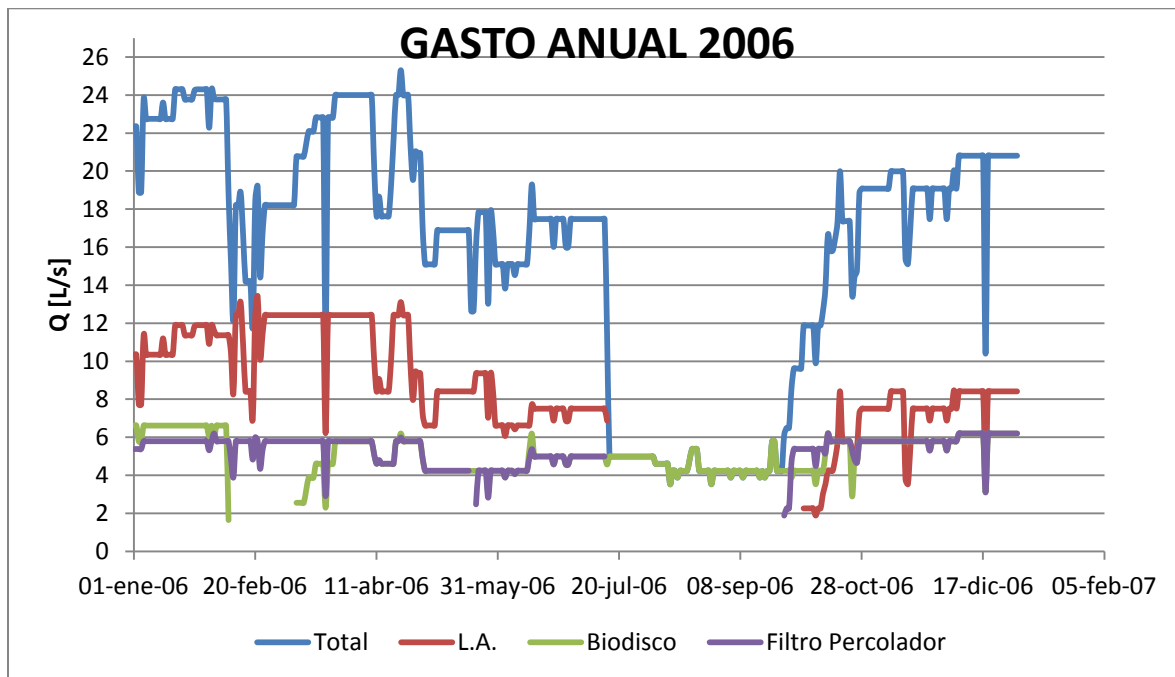


Figura 4.5 -- Gastos anuales de cada sistema de tratamiento de la PTARCA, año 2006

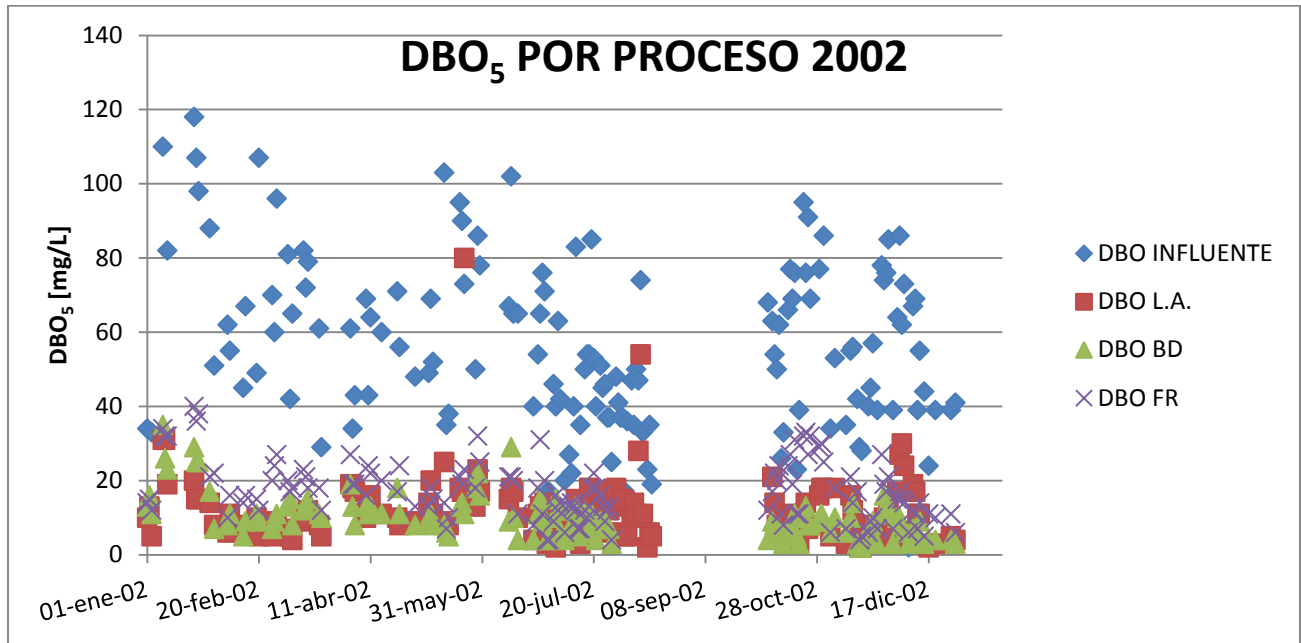


Figura 4.6 – DBO₅ de cada sistema de tratamiento, año 2002

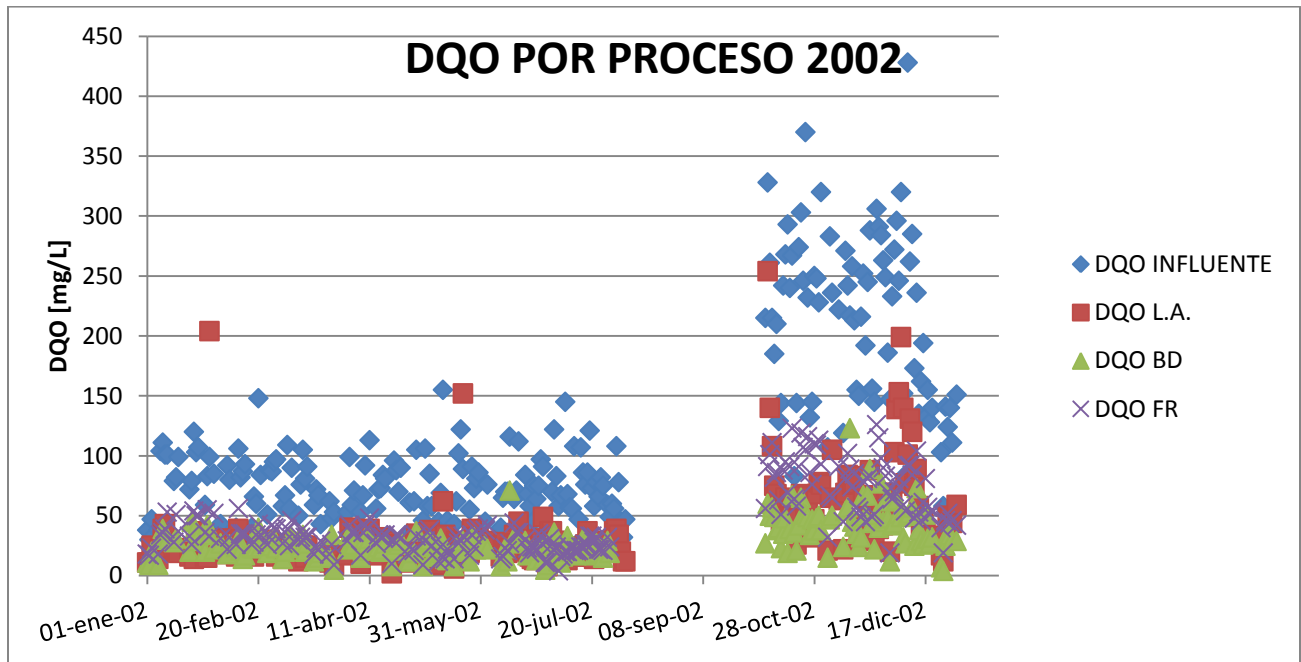


Figura 4.7 – DQO de cada sistema de tratamiento, año 2002

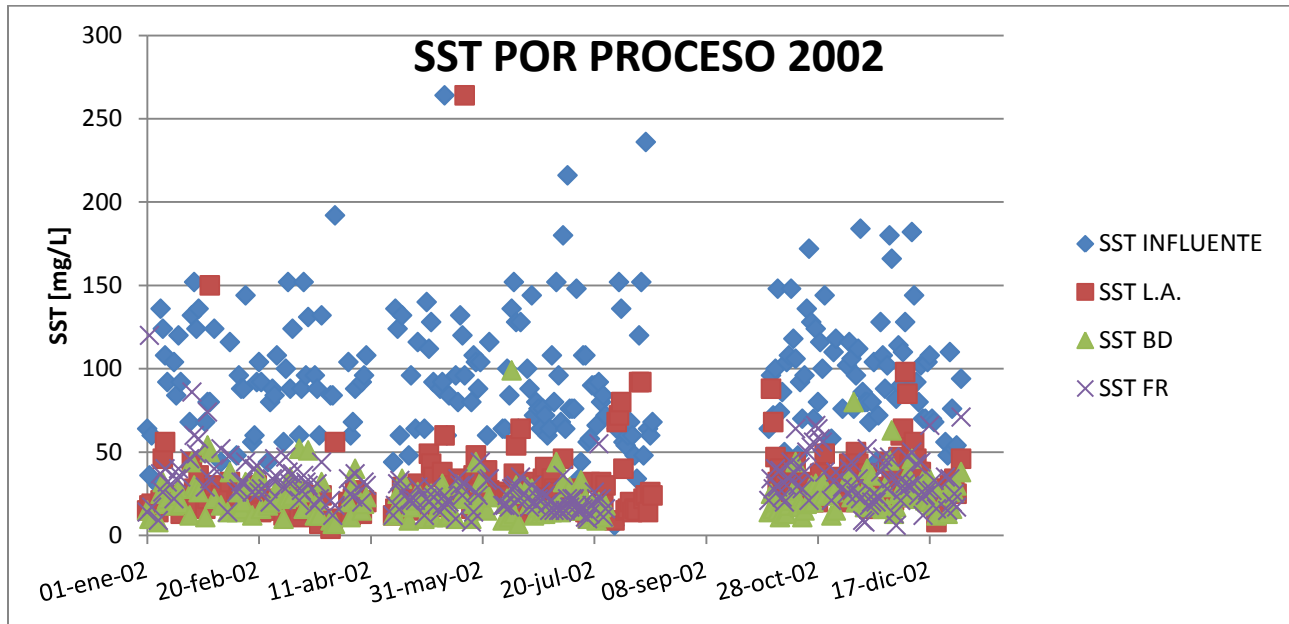
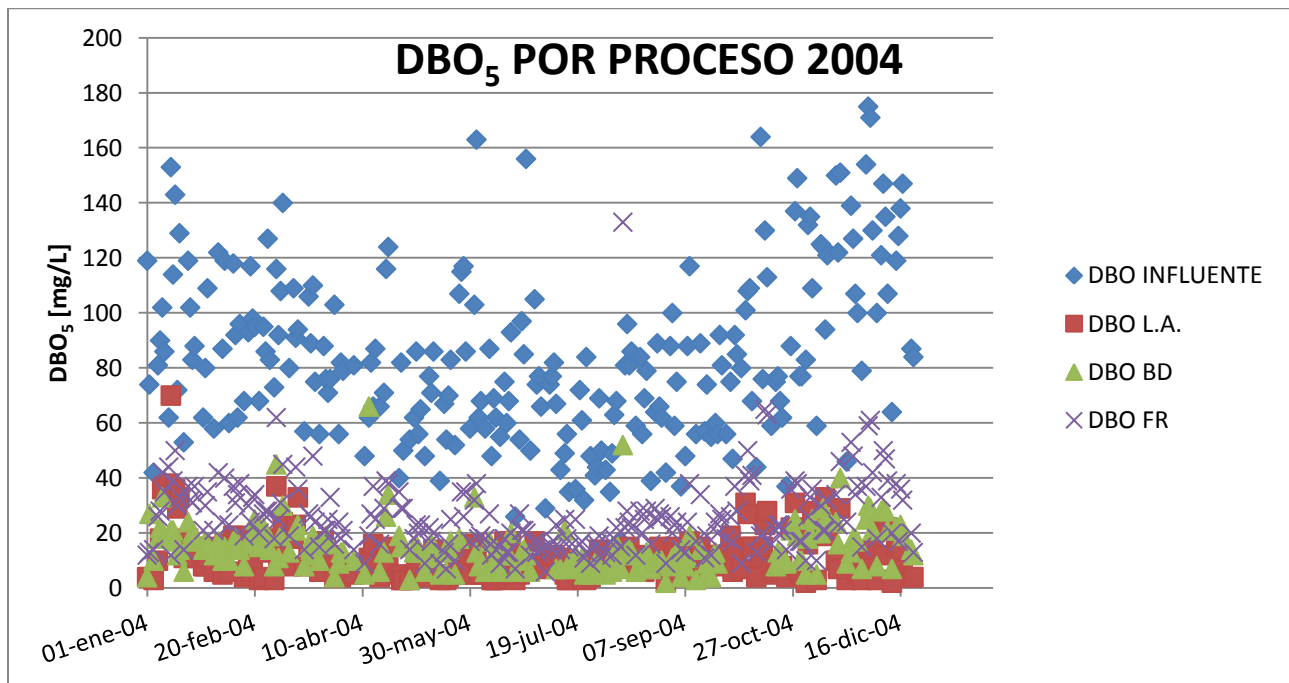


Figura 4.8 – SST de cada sistema de tratamiento, año 2002

Figura 4.9 – DBO₅ de cada sistema de tratamiento, año 2004

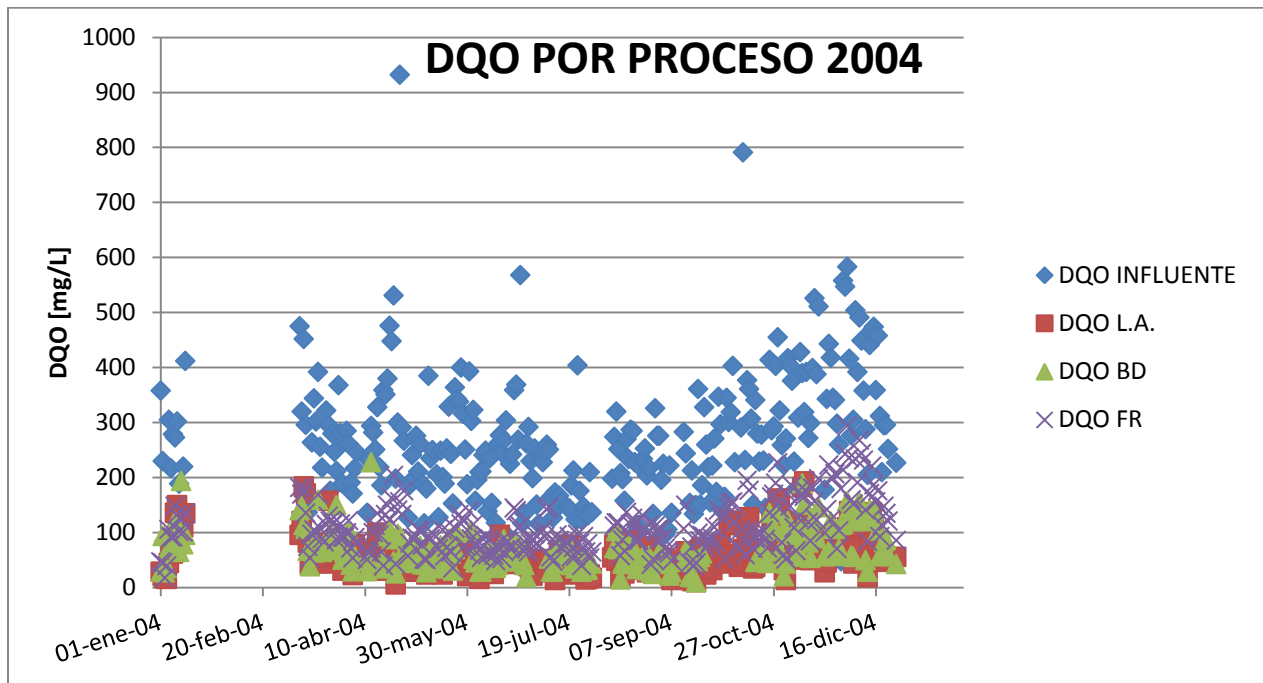


Figura 4.10 – DQO de cada sistema de tratamiento, año 2004

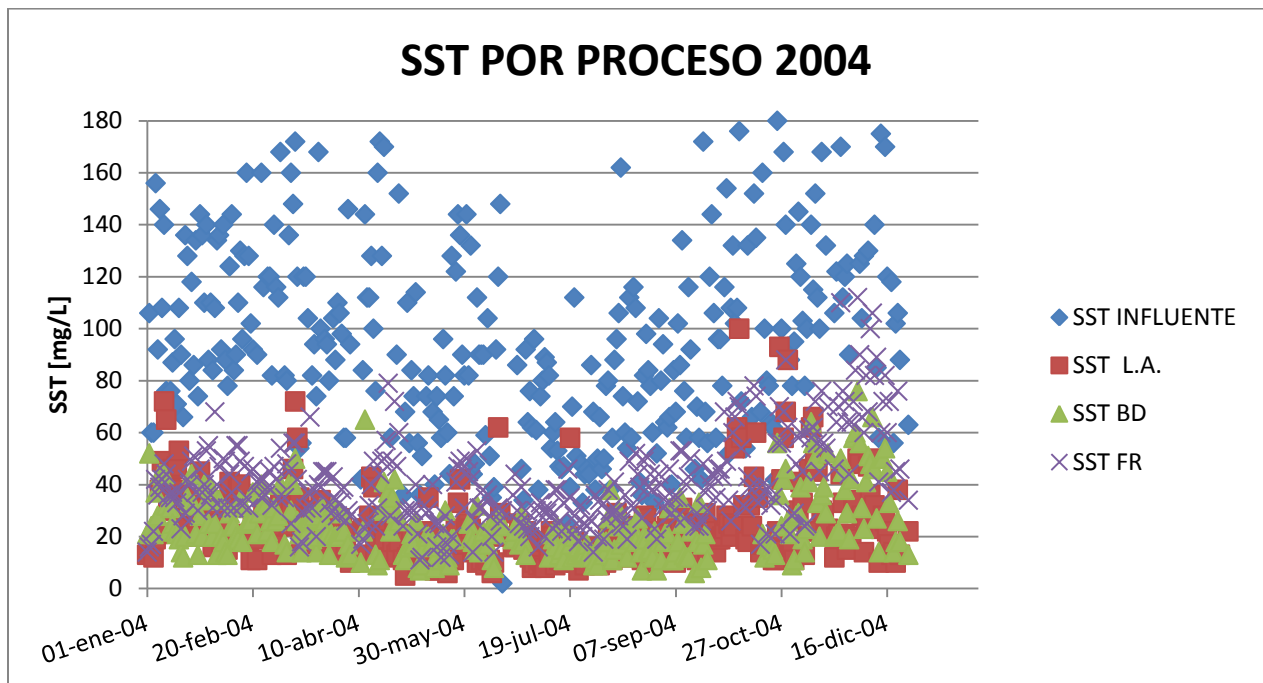


Figura 4.11 – SST de cada sistema de tratamiento, año 2004

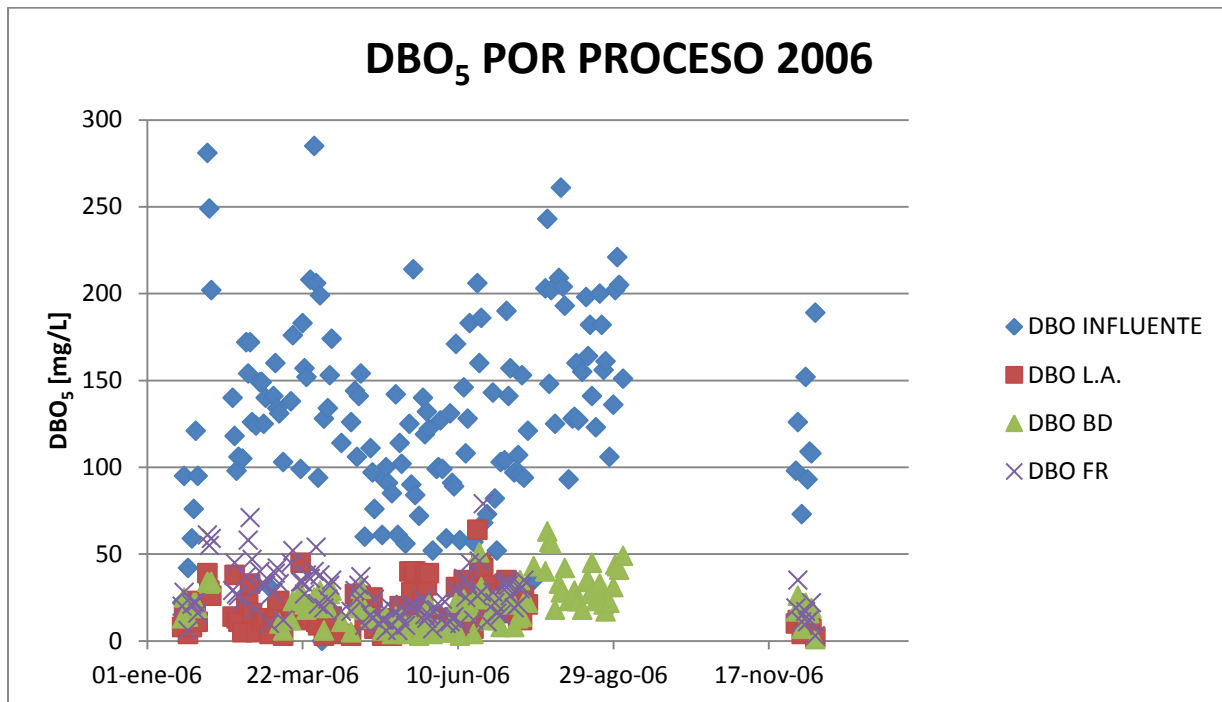
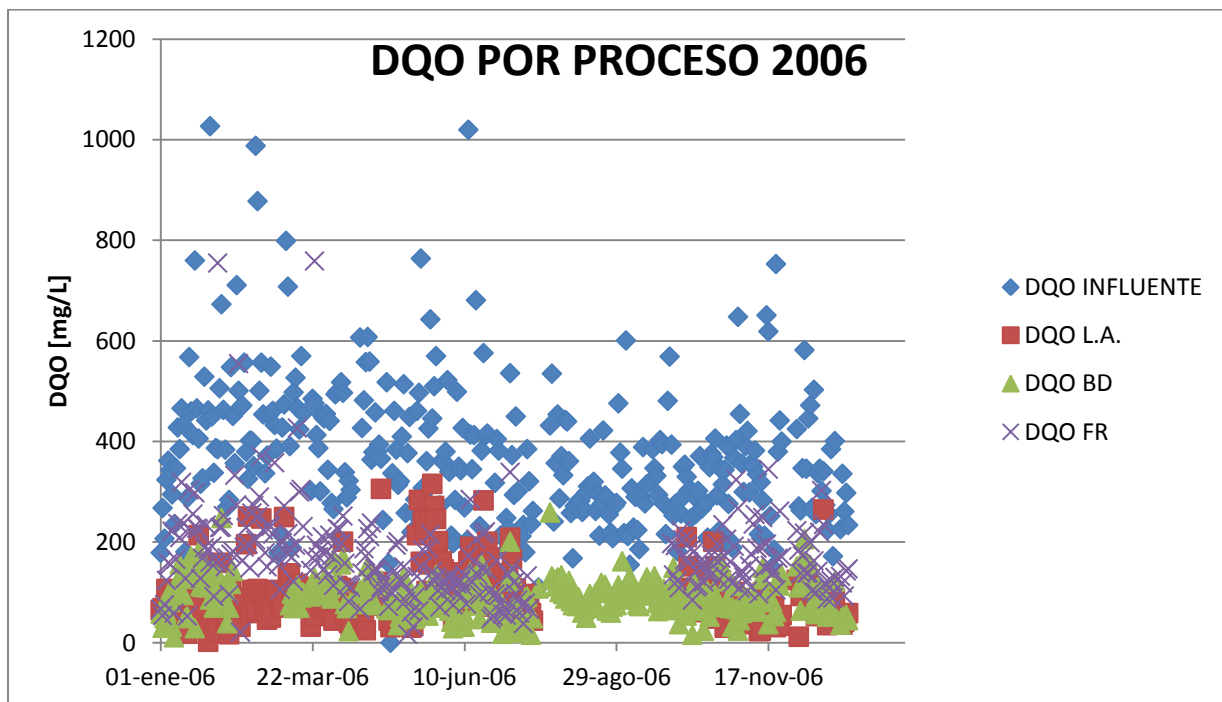
Figura 4.12 – DBO₅ de cada sistema de tratamiento, año 2006

Figura 4.13 – DQO de cada sistema de tratamiento, año 2006

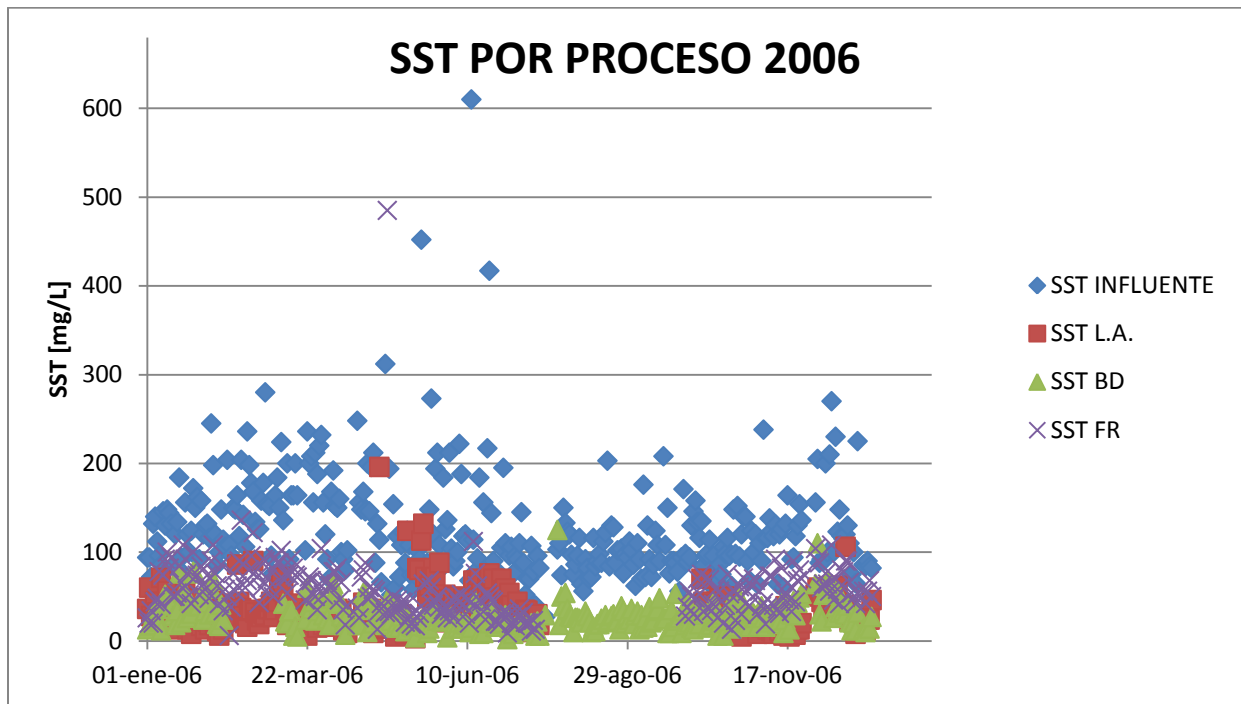


Figura 4.14 – SST de cada sistema de tratamiento, año 2006

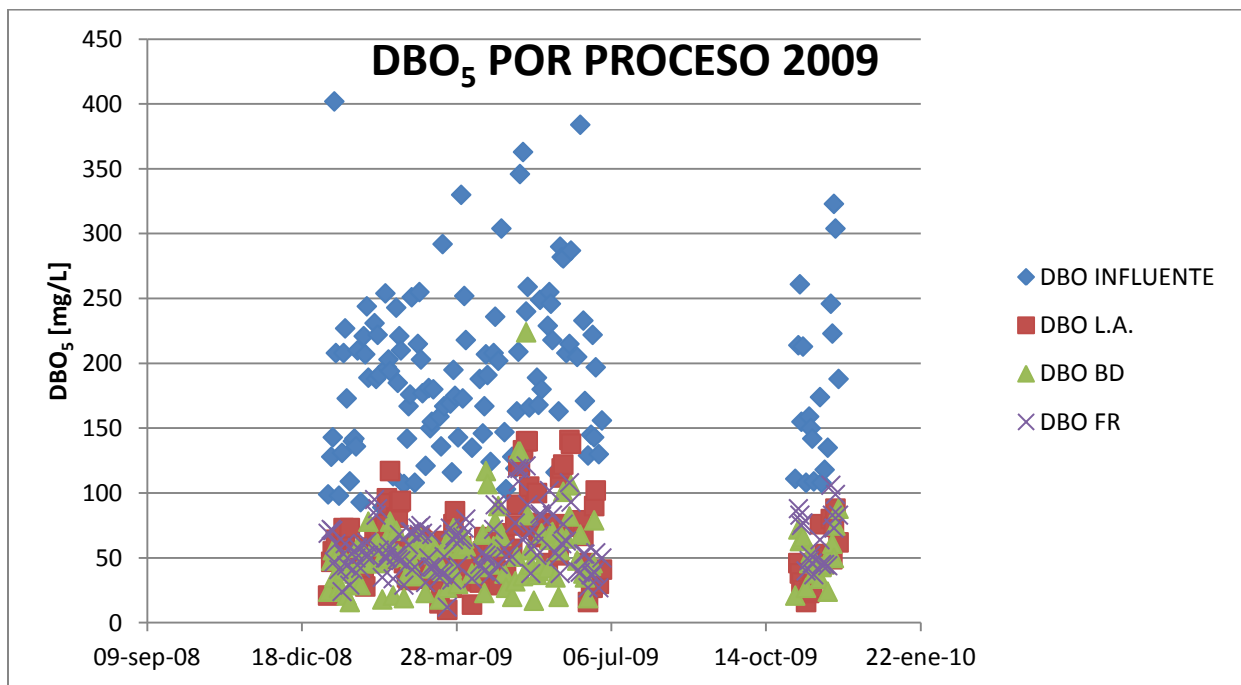


Figura 4.15 – DBO₅ de cada sistema de tratamiento, año 2009

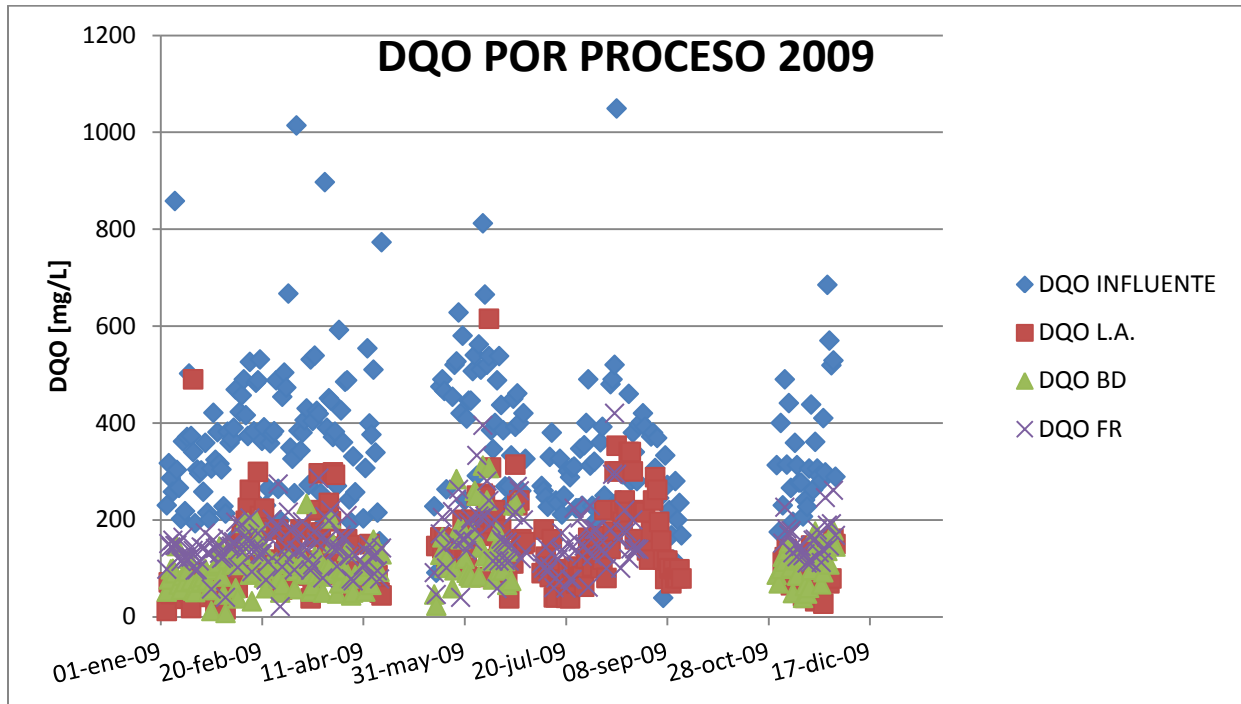


Figura 4.16 – DQO de cada sistema de tratamiento, año 2009

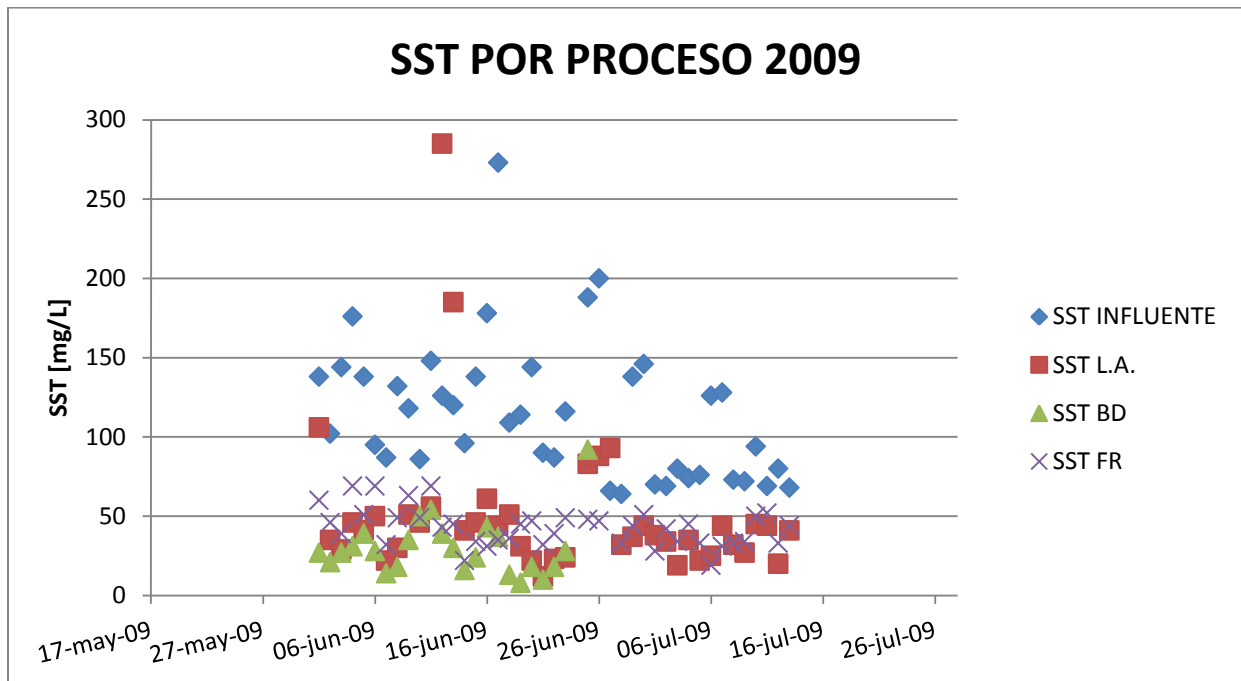


Figura 4.17 – SST de cada sistema de tratamiento, año 2009

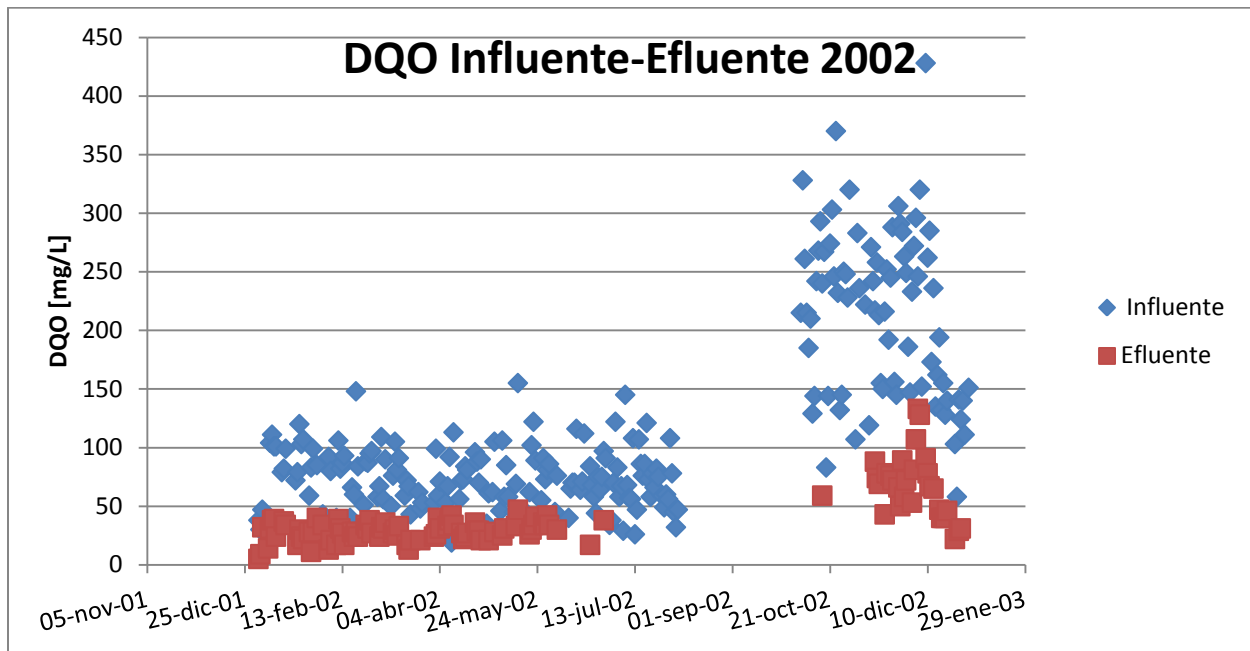


Figura 4.18 – DQO del influente y efluente total de la fase 1, año 2002

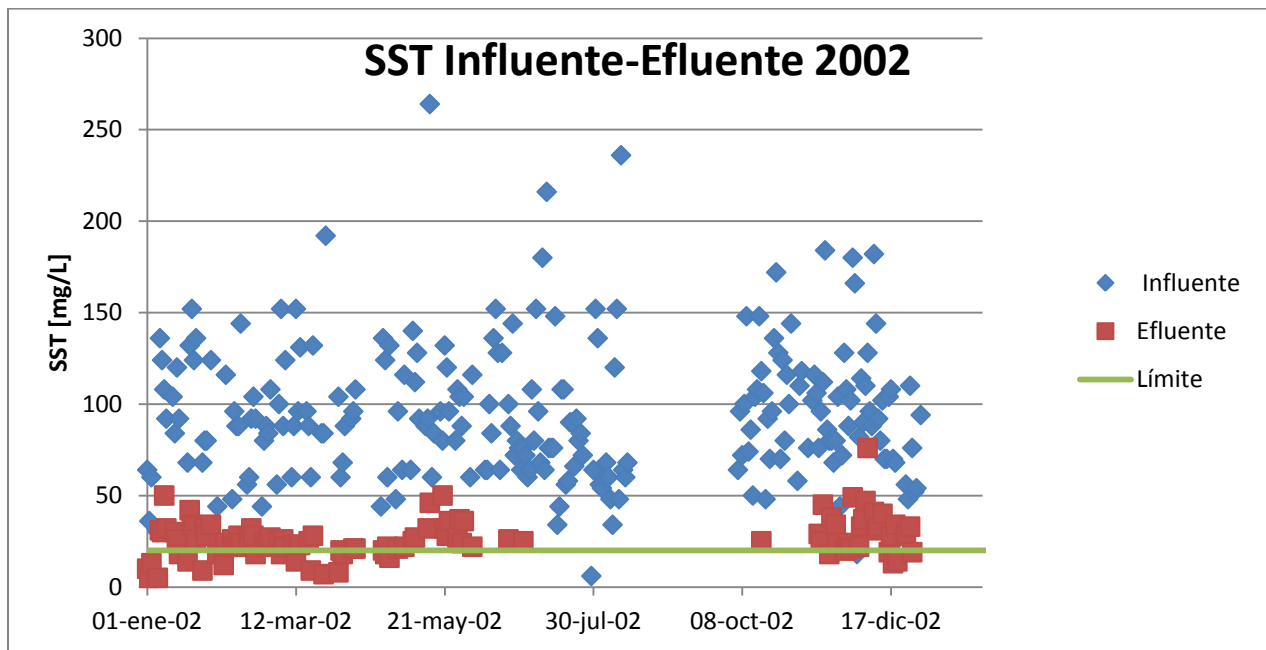


Figura 4.19 – SST del influente y efluente total de la fase 1, año 2002

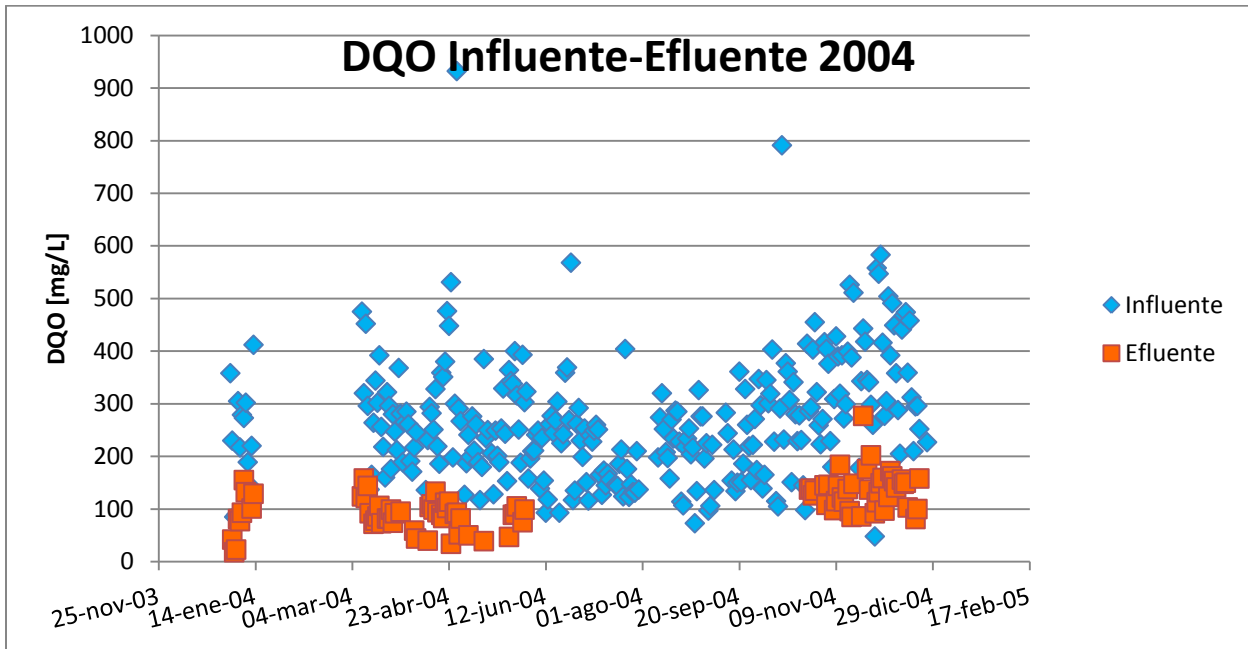


Figura 4.20 – DQO del influente y efluente total de la fase 1, año 2004

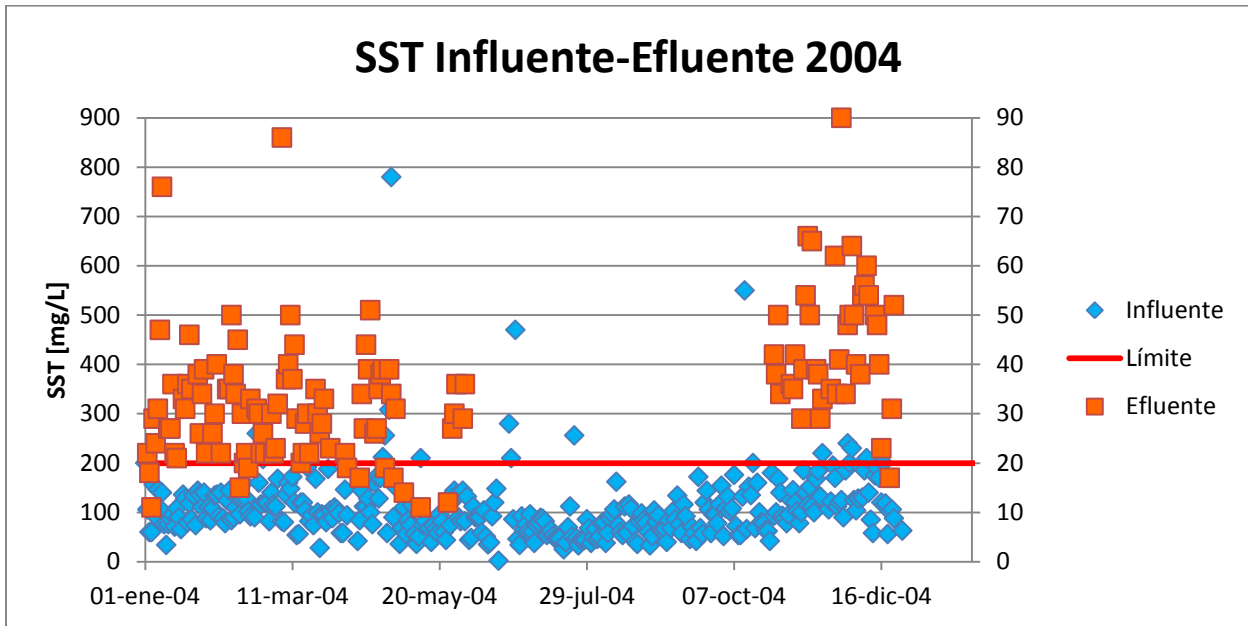


Figura 4.21 – SST del influente y efluente total de la fase 1, año 2004

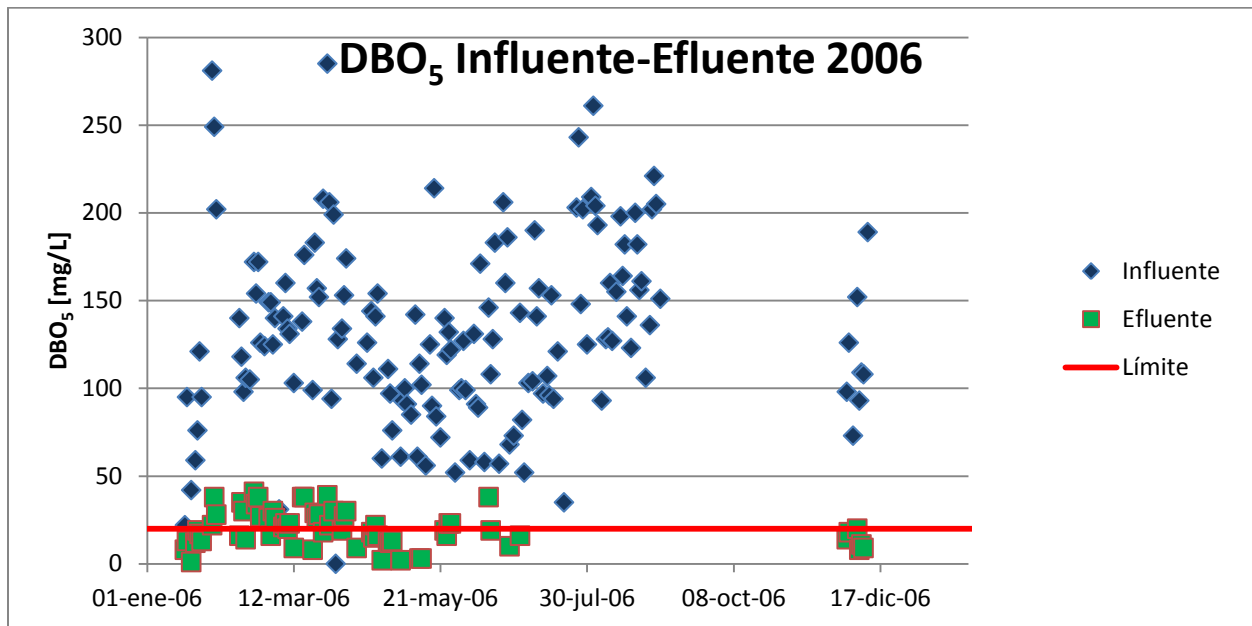


Figura 4.22 – DBO del influente y efluente total de la fase 1, año 2006

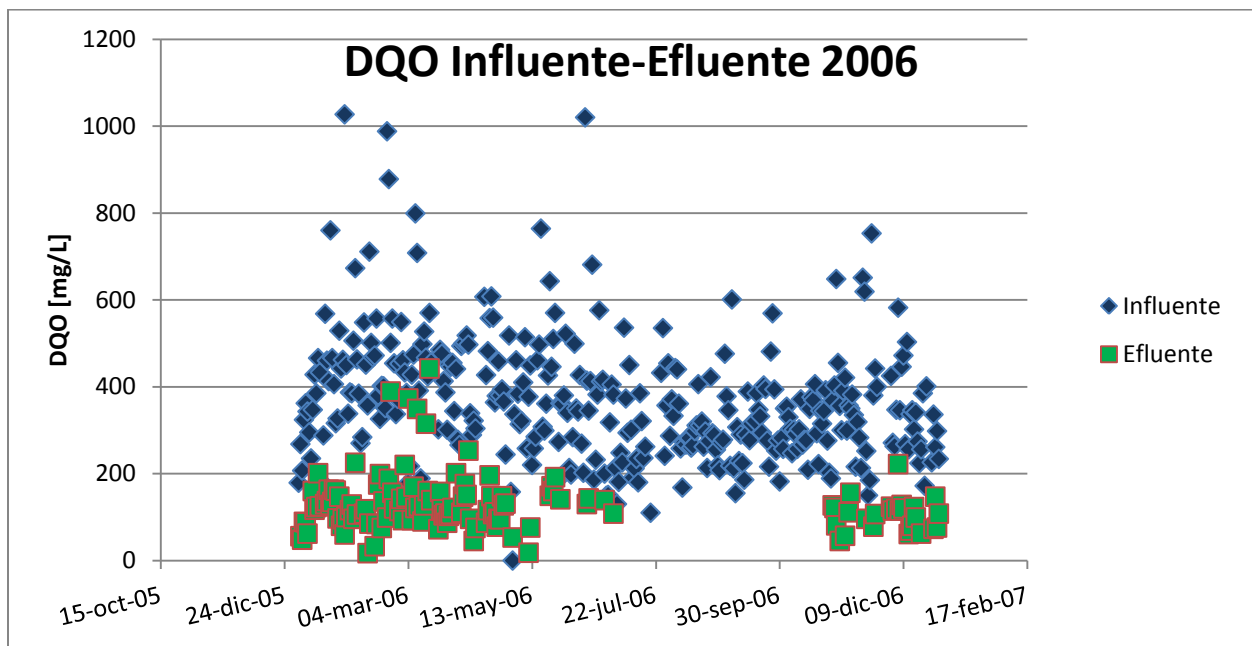


Figura 4.23 – DQO del influente y efluente total de la fase 1, año 2006

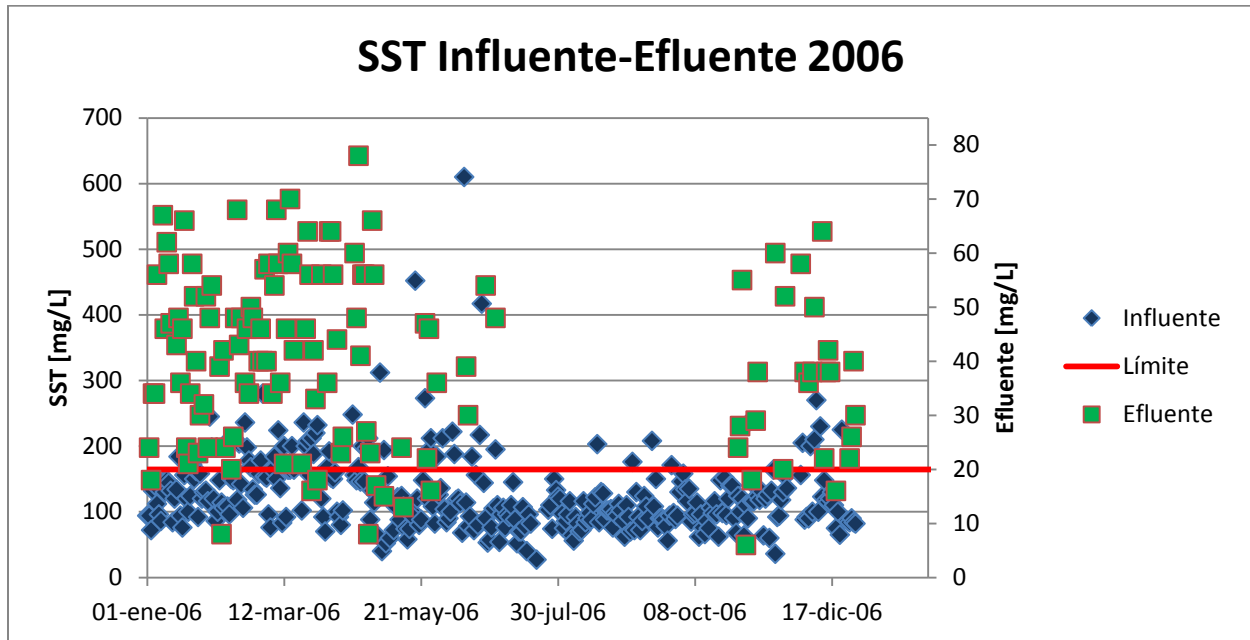


Figura 4.24 – SST del influente y efluente total de la fase 1, año 2006

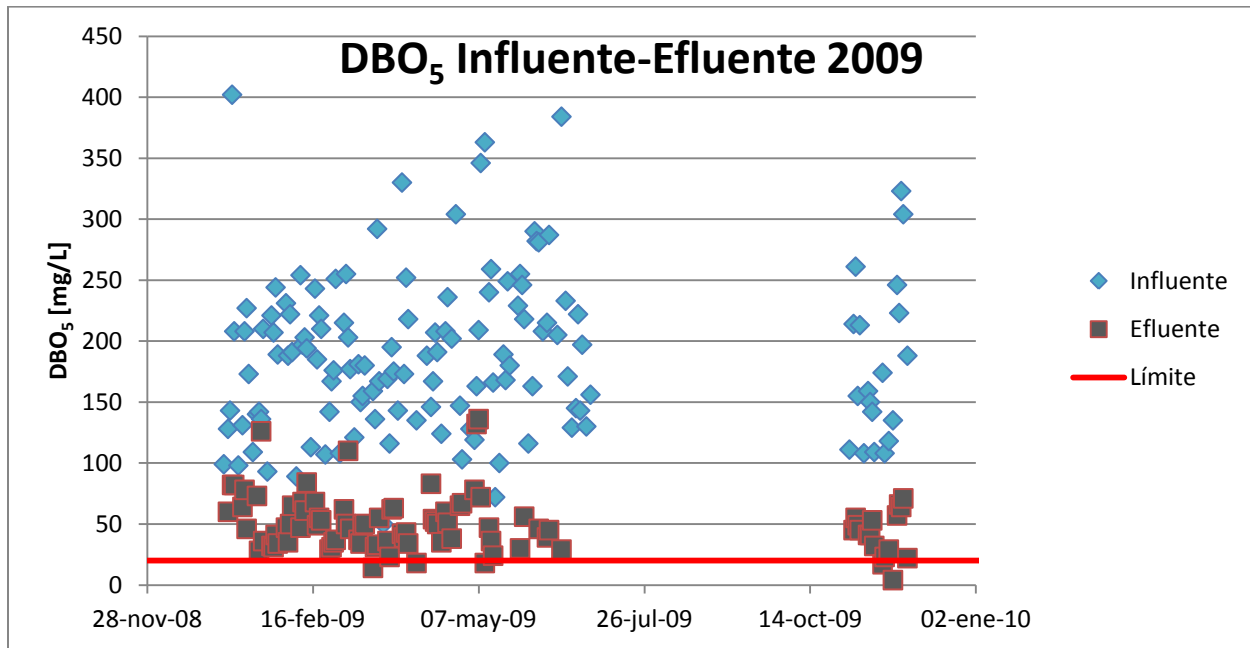


Figura 4.25 – DBO del influente y efluente total de la fase 1, año 2009

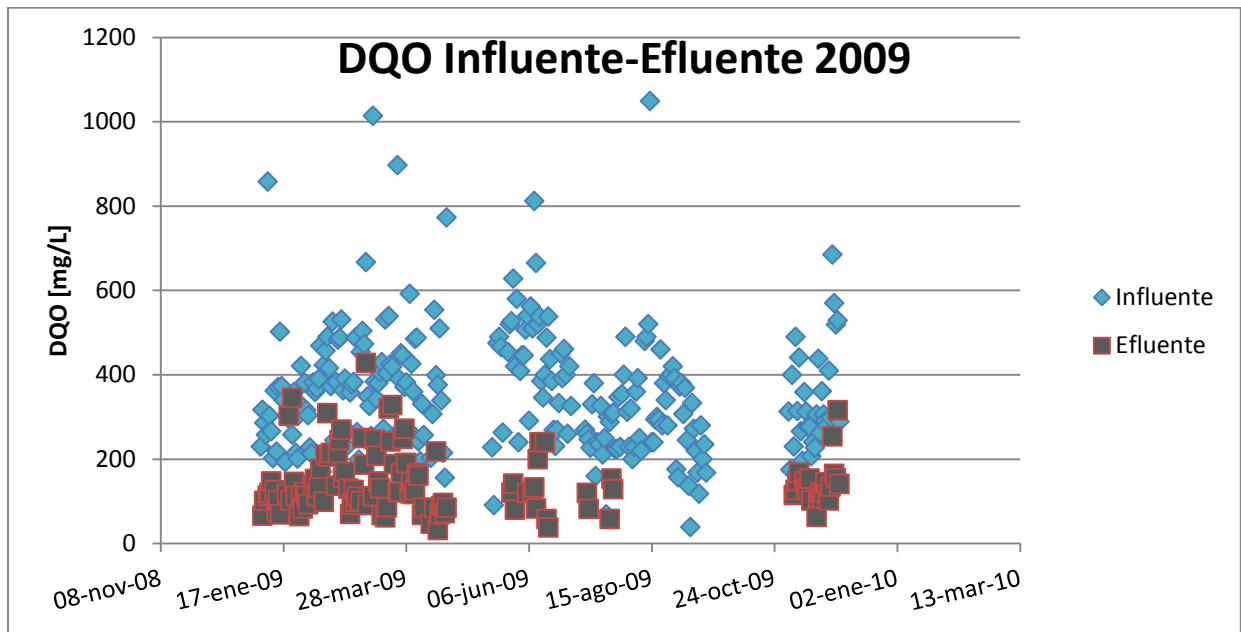


Figura 4.26 – DQO del influente y efluente total de la fase 1, año 2009

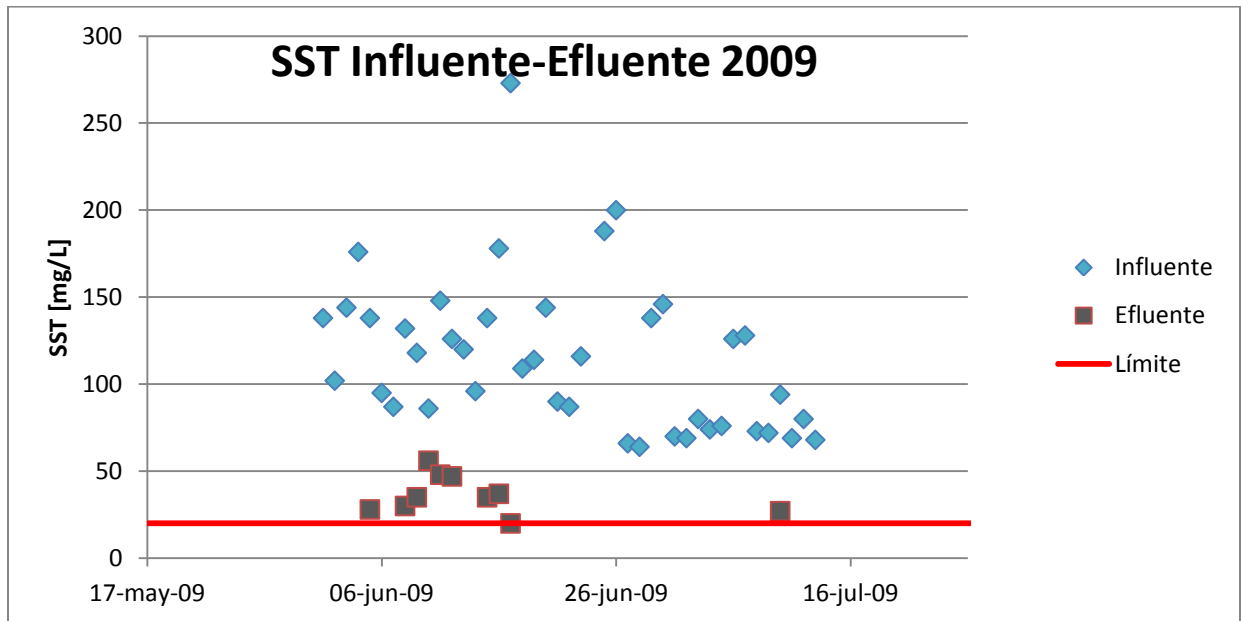


Figura 4.27 – SST del influente y efluente total de la fase 1, año 2009

Resultados del sistema BRM, influente y efluente

En esta sección se presentan los resultados disponibles de la demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días (DBO_5), la demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos suspendidos totales (SST) de los años en los que el sistema BRM entró en operación (2011, 2012 y 2013).

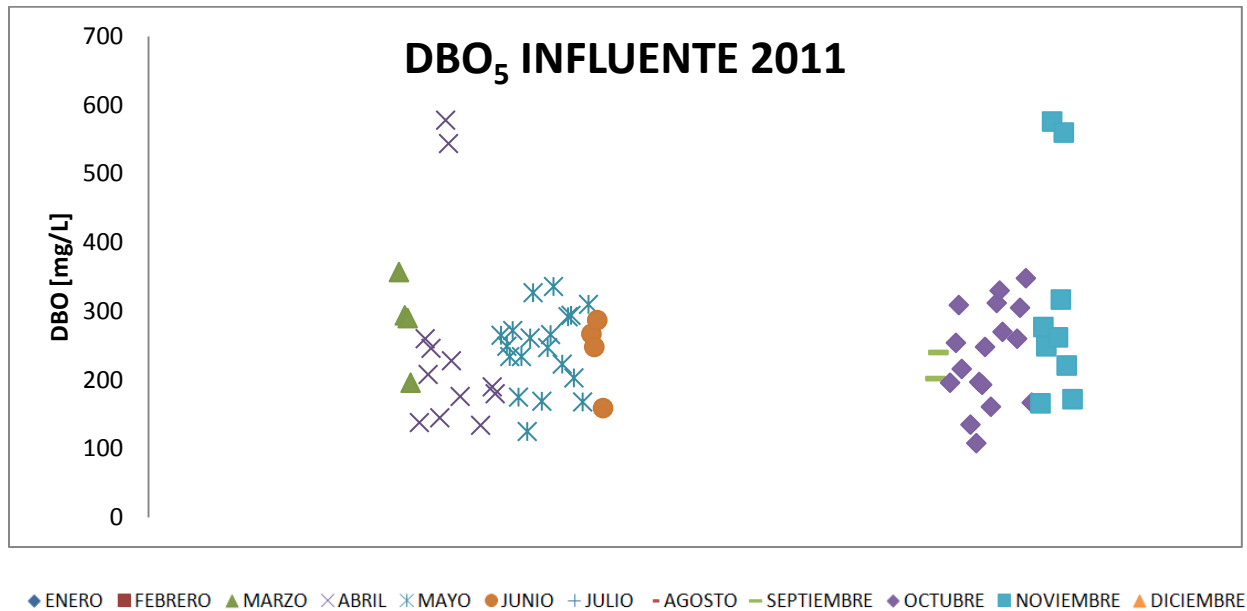


Figura 4.28 – DBO_5 del influente, año 2011

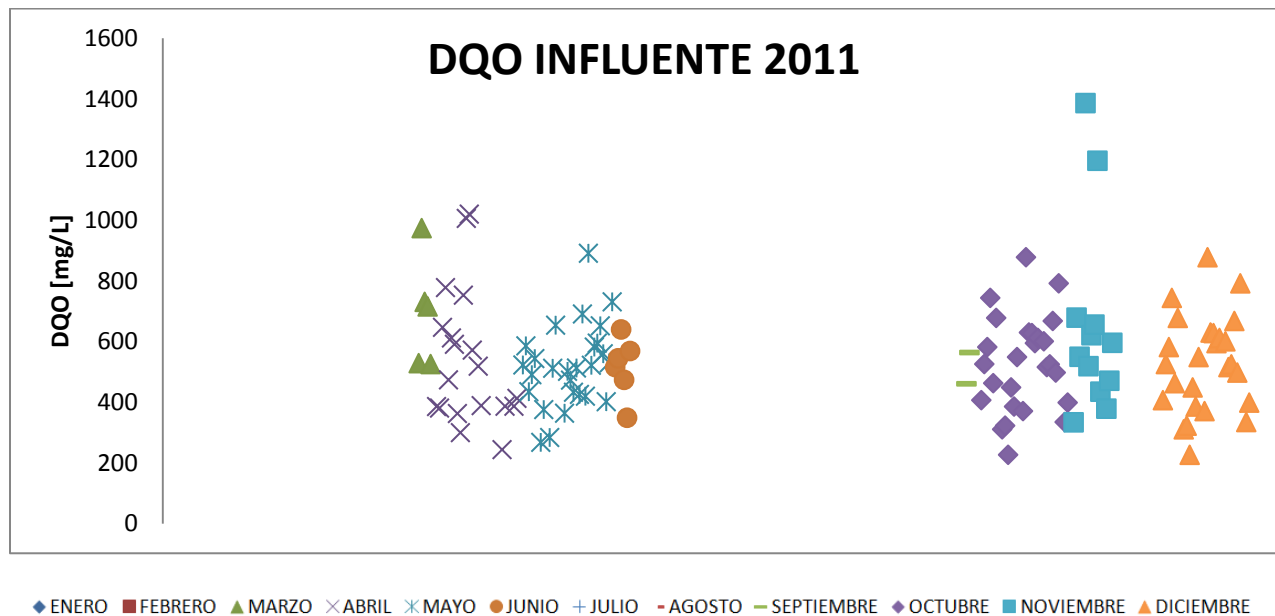


Figura 4.29 – DQO del influente, año 2011

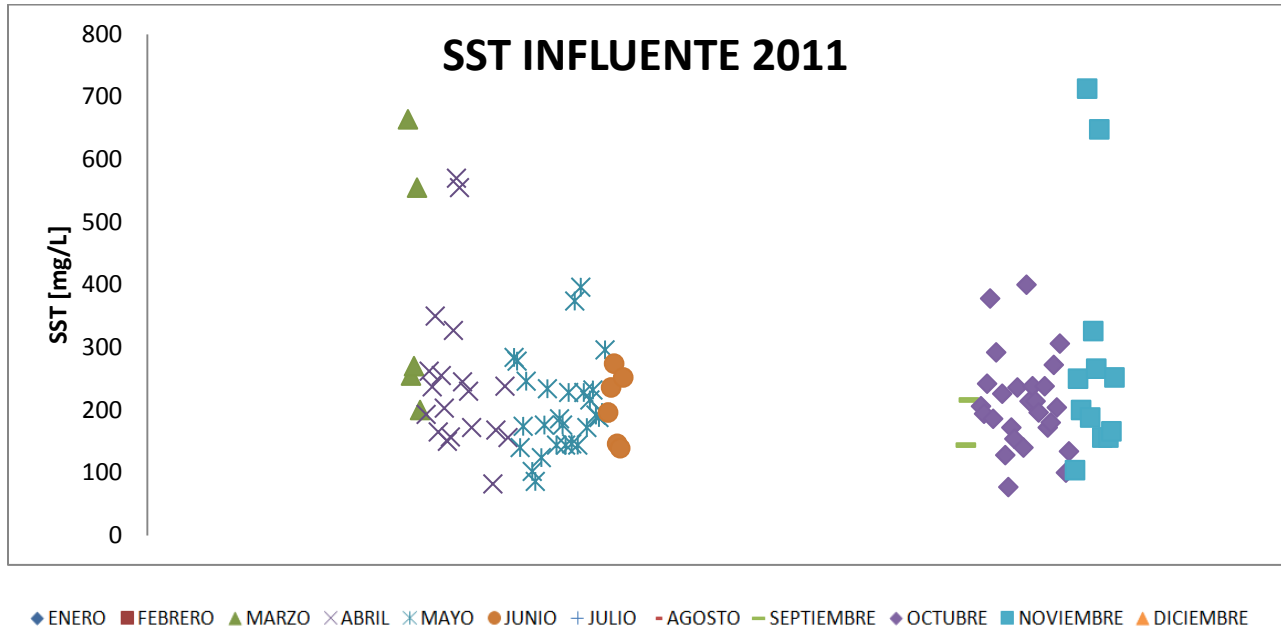


Figura 4.30 – SST del influente, año 2011

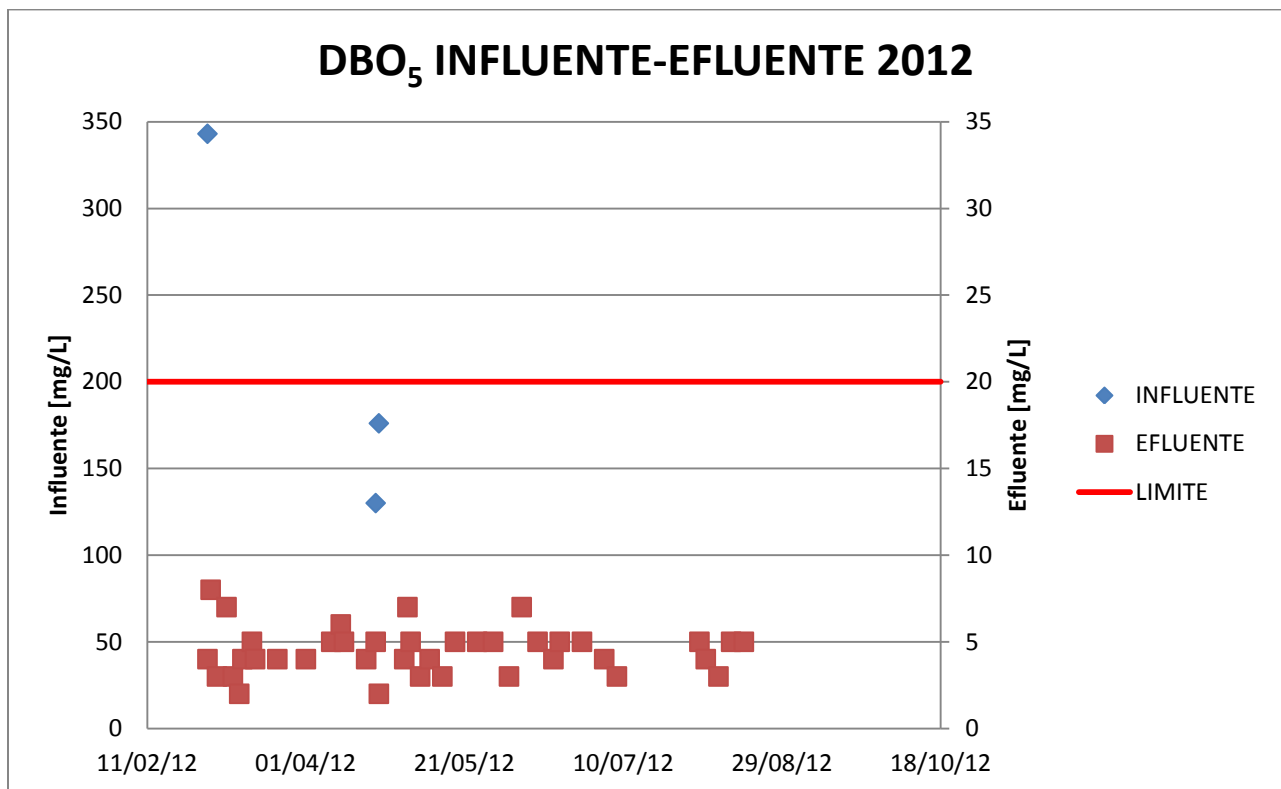


Figura 4.31 – DBO₅ del influente y efluente, año 2012

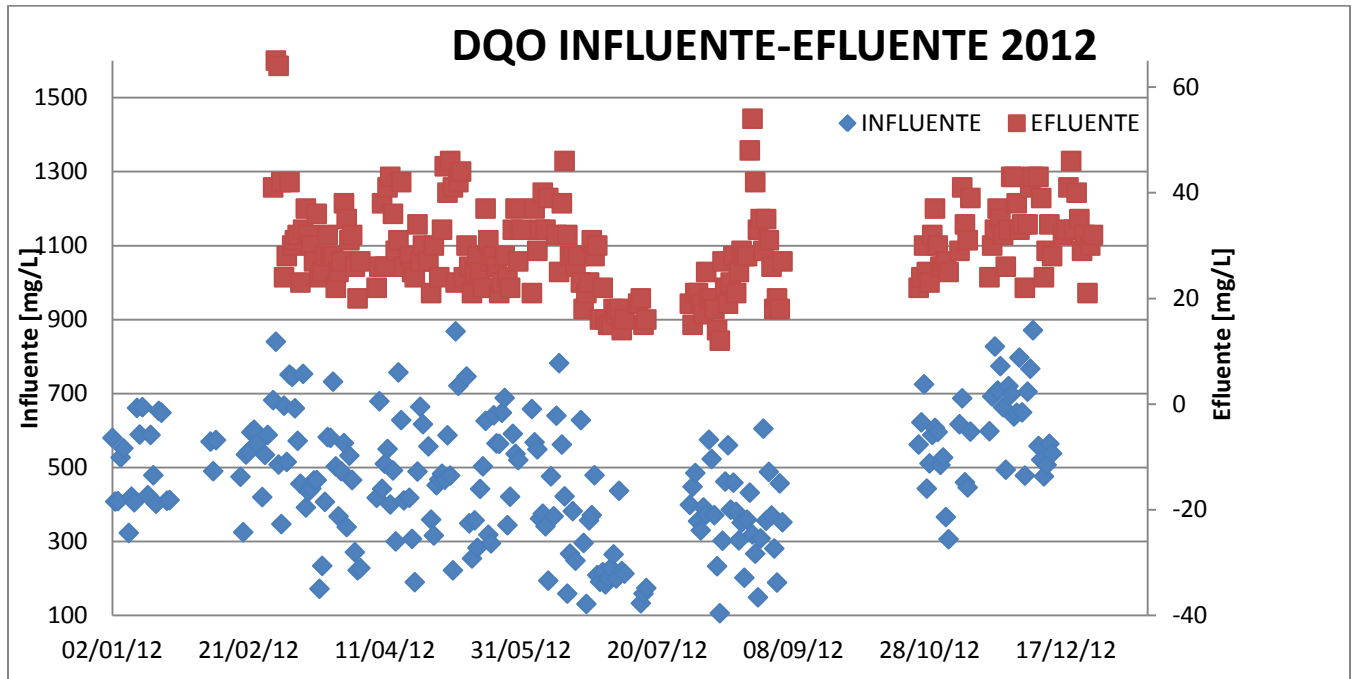


Figura 4.32 – DQO del influente y efluente, año 2012

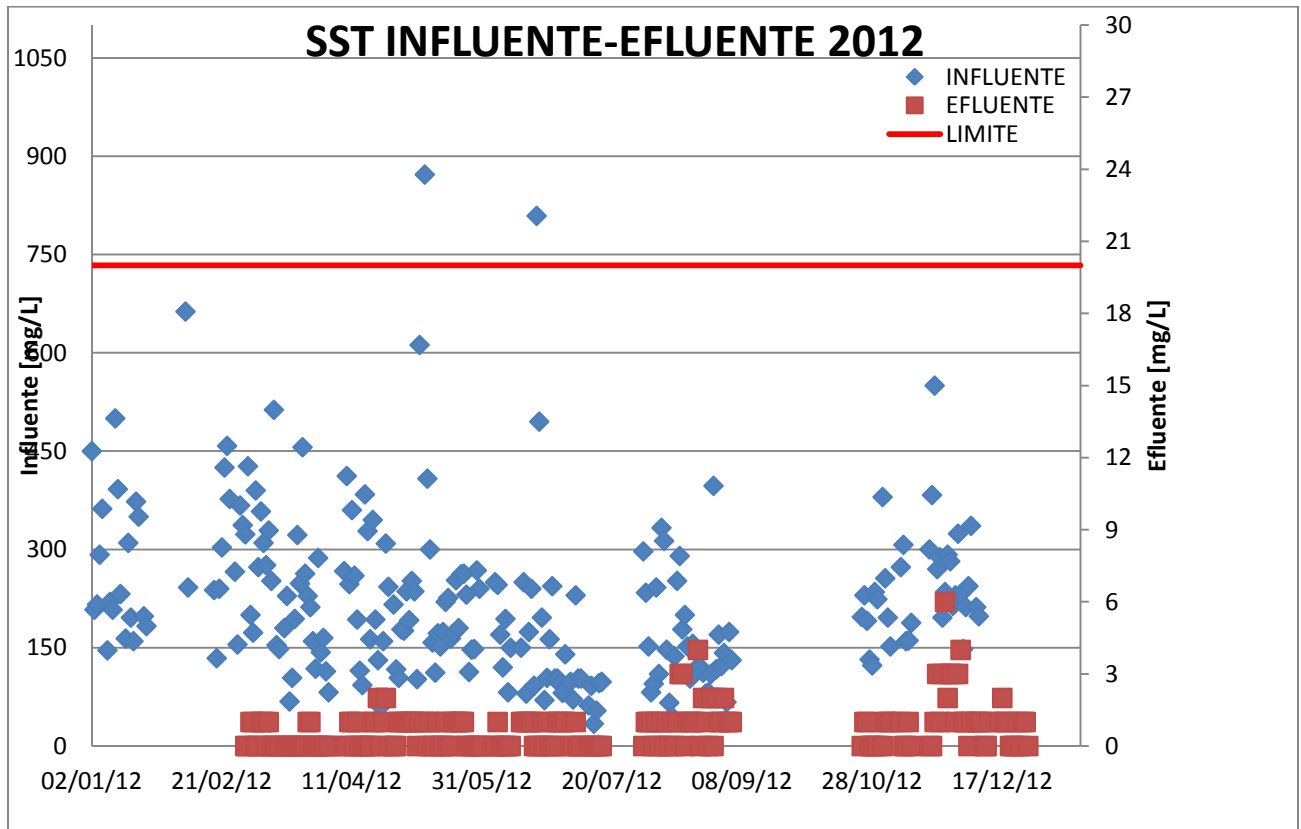


Figura 4.33 – SST del influente y efluente, año 2012

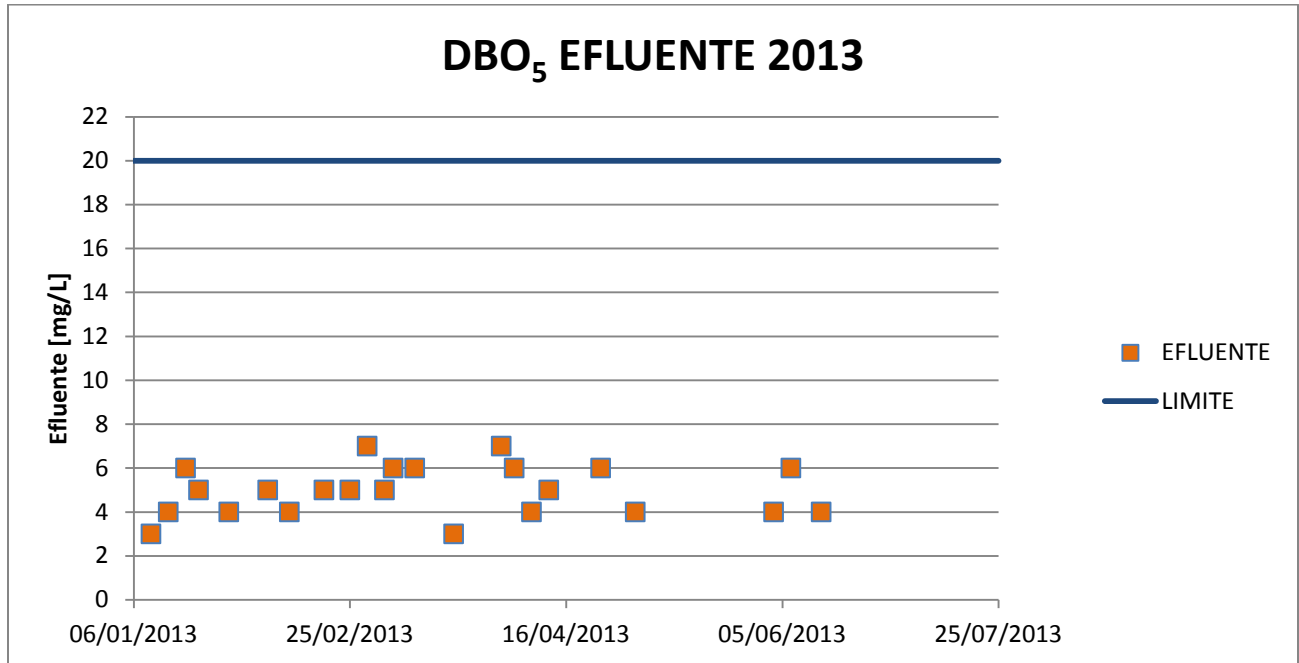


Figura 4.34 – DBO₅ del efluente, año 2013

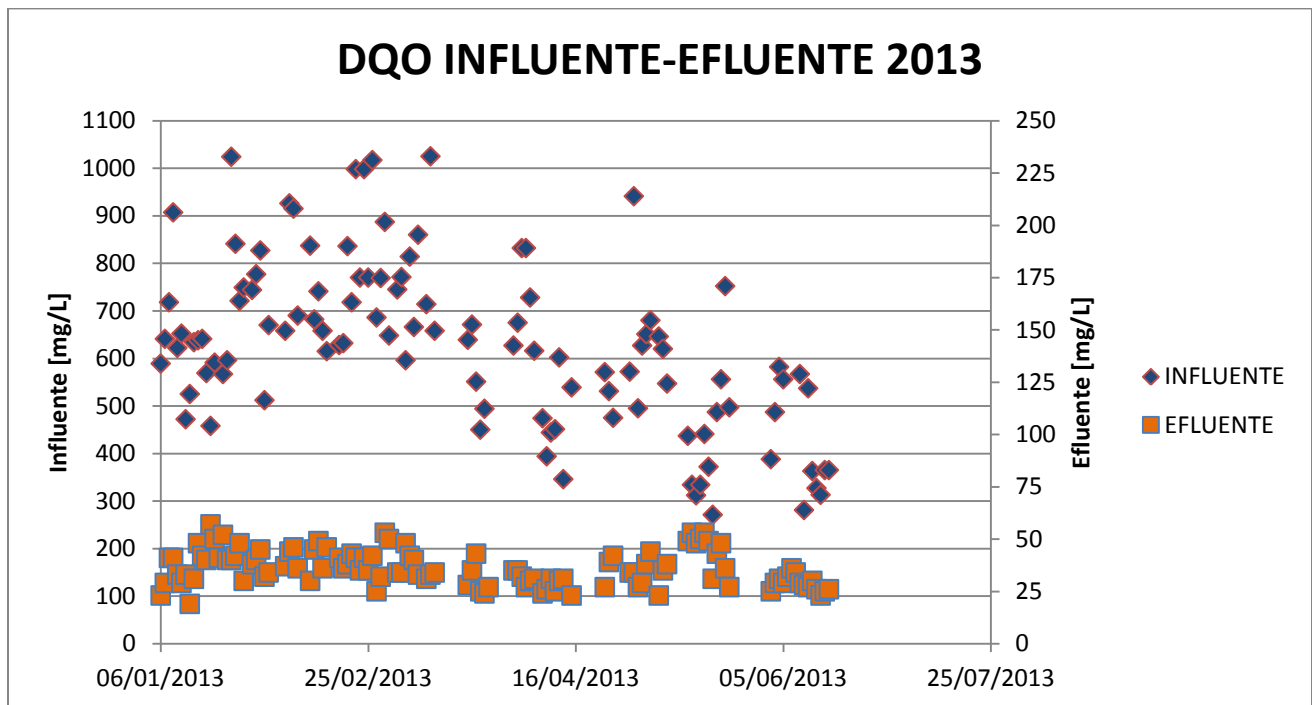


Figura 4.35 – DQO del influente y efluente, año 2013

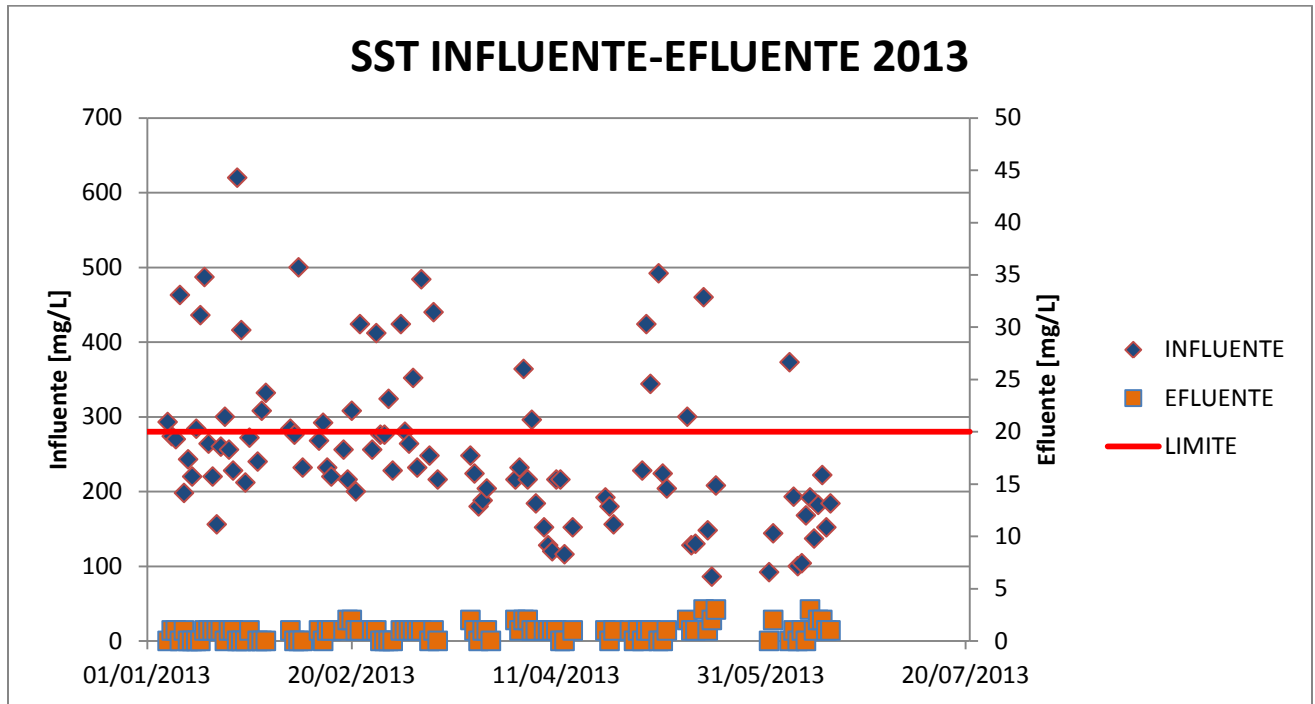


Figura 4.36 – SST del influente y efluente, año 2013

4.4. Análisis de resultados de calidad del agua

En las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5 se puede observar la variación del gasto con el tiempo. En el año 2002 se tuvo el gasto más alto con 37 L/s en abril y el gasto más bajo con 9.85 L/s en agosto. En este año se interrumpió la operación de los procesos de lodos activados y biodiscos a finales de julio y a principios de agosto los tres procesos dejaron de producir agua hasta principios de octubre. En el año 2004, se tuvo el gasto con mayor magnitud a mediados de octubre, con 34.78 L/s y el de menor magnitud se presentó a mediados de julio, con 3.26 L/s, en este año la planta prácticamente tuvo una operación continua todo el año a excepción de algunas interrupciones mínimas en el proceso de biodiscos. Los gastos en el año 2006 son muy similares al del año 2002, teniendo un gasto máximo de 25.31 L/s en abril y un gasto mínimo de 3.53 L/s en agosto. La tendencia en la operación de la planta es que en los meses de julio, agosto y septiembre el gasto disminuye considerablemente o se interrumpe completamente la operación, mientras que en los meses de enero, marzo, abril y mayo el gasto se incrementa y se produce la mayor cantidad de agua tratada.

Las interrupciones en la operación y la variación del gasto se deben principalmente a trabajos de mantenimiento, a falta de agua cruda en temporada de vacaciones y a la caída en la demanda de agua tratada en temporada de lluvias.

Los resultados de calidad del agua que se presentan de cada proceso de la fase uno, se refieren a los obtenidos en los sedimentadores secundarios de cada proceso. Para empezar se analiza la demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días (DBO_5), en las Figuras 4.6, 4.9, 4.12 y 4.15; se observa que en los



primeros años (2002 a 2004) la calidad se mantiene uniforme y la mayor cantidad de datos se encuentran por debajo de los 20 mg/L, sin embargo, a partir del año 2006 se empieza a notar que la calidad se empieza a deteriorar y la DBO_5 empieza a tener un incremento considerable con un rango de 1 a 50 mg/L; finalmente la información más reciente (año 2009) indica que la calidad seguía empeorando ahora teniendo la mayoría de datos de DBO_5 entre 1 y 100 mg/L. Comparando las Tablas 4.2, 4.3 y 4.4 se puede notar que el subsistema más eficiente en cuanto a remoción de la DBO_5 era el de discos biológicos rotatorios, teniendo en los primeros años los rangos con los valores de menor magnitud de DBO_5 , mientras que el subsistema que resultó tener los valores más altos fue el de filtro rociador.

En las Figuras 4.7, 4.10, 4.13 y 4.16 se presentan los resultados de la demanda química de oxígeno (DQO), los cuales tienen una tendencia similar a los de la DBO_5 . Empezando nuevamente con el año 2002, se observa que la calidad del agua obtenida tenía valores menores a 50 mg/L hasta finales de julio, donde se interrumpe la operación y los últimos tres meses del año se obtienen valores entre 20 y 85 mg/L. A partir de ahí la DQO subió gradualmente, en el año 2004 se mantuvo una DQO debajo de los 100 mg/L por la mayor parte de año, hasta que los últimos meses otra vez subió hasta 150 mg/L para los procesos de lodos activados y biodiscos y 200 mg/L en el caso del filtro rociador. En el año 2006 la DQO se mantuvo estable entre 100 y 200 mg/L, aunque en los meses de febrero y abril se llegaron a registrar valores de DQO de 300 mg/L. En el 2009 la DQO se mantuvo en su mayoría por debajo de los 250 mg/L y sólo en algunos días de los meses de febrero, abril y septiembre los valores de DQO llegaron a estar por encima de 300 mg/L. Nuevamente el filtro rociador fue el subsistema menos eficiente que entregaba agua con menor calidad.

En el caso de los sólidos suspendidos totales (SST) la tendencia, al igual que en los otros dos parámetros, era de incrementarse con el tiempo (Figuras 4.8, 4.11, 4.14 y 4.17). En el 2002, encontramos la mayoría de valores por debajo de los 40 mg/L, mientras que en el año 2004 se mantienen la mayoría de datos por debajo de los 60 mg/L hasta los últimos meses donde empezamos a encontrar datos por encima de 70 mg/L en el caso del proceso de lodos activados y biodiscos y encima de 80 mg/L en el filtro rociador. En el 2006 los tres procesos mostraron la mayor cantidad de datos por debajo de los 60 mg/L aunque en los meses de mayo y junio el proceso de lodos activados registró valores por encima de los 80 mg/L, mientras que el filtro rociador mostró datos entre 80 y 120 mg/L en los meses de enero, febrero y diciembre. En el año 2009 se tuvieron datos únicamente del mes de junio y julio donde todos los procesos tenían la mayor cantidad de datos por debajo de los 70 mg/L. Cabe mencionar que estos parámetros son los obtenidos después de darle al agua un tratamiento secundario, por lo que aún necesitan de tratamiento adicional que consiste en el subsistema de filtración y desinfección.

Haciendo un análisis general se puede decir que la calidad del agua del influente fue empeorando con el paso de los años y los tres procesos existentes en ese tiempo no tenían la capacidad para seguir produciendo agua de la misma calidad. El subsistema de discos biológicos rotatorios fue el proceso que mejor manejó la variación en la calidad del agua, mientras que el filtro rociador fue el que entregó los resultados más desfavorables en comparación con los otros dos subsistemas.



Tabla 4.2 – Eficiencia promedio anual del subsistema de lodos activados

PARÁMETRO/AÑO	2002	2004	2006	2009	PROMEDIO
DBO ₅	78.46%	86.01%	84.55%	67.04%	79.01%
DQO	67.04%	76.27%	73.40%	63.23%	69.99%
SST	68.06%	75.20%	70.84%	63.34%	69.36%

Tabla 4.3 – Eficiencia promedio anual del subsistema de discos biológicos rotatorios

PARÁMETRO/AÑO	2002	2004	2006	2009	PROMEDIO
DBO ₅	82.36%	82.90%	84.20%	71.07%	80.13%
DQO	71.70%	72.49%	72.81%	70.34%	71.83%
SST	74.34%	74.54%	72.08%	76.99%	74.49%

Tabla 4.4 – Eficiencia promedio anual del subsistema de filtro rociador

PARÁMETRO/AÑO	2002	2004	2006	2009	PROMEDIO
DBO ₅	70.45%	69.36%	78.04%	66.83%	71.17%
DQO	60.46%	58.13%	54.42%	56.37%	57.34%
SST	66.97%	53.64%	50.82%	59.66%	57.77%

Hasta ahora hemos analizado la calidad del agua de los tres procesos después de un tratamiento secundario, ahora vamos a estudiar la calidad del agua después de pasar por el sistema de desinfección. En cuanto a la DBO₅, se presentan en las Figuras 4.22 y 4.25 los resultados que indican que en el 2006 más del 50% de los datos obtenidos están por encima de los 20 mg/L que permite la NOM-003-SEMARNAT-1997 y en el 2009 más del 90% se encuentran en la misma situación. Como se mencionaba anteriormente, la calidad del influente tiende a empeorar conforme pasa el tiempo lo que a su vez compromete la calidad del efluente.

La DQO del año 2002 mantuvo un efluente por debajo de los 40 mg/L a través de la mayor parte del año, sin embargo, a mediados del mes de noviembre se disparó a valores por encima de 60 y hasta 80 mg/L en algunos días. La misma tendencia siguió en los años subsecuentes, incrementándose cada vez más la DQO del influente y por consecuencia del efluente. El efluente del año 2004 mantuvo la mayor cantidad de datos por debajo de los 150 mg/L, mientras que en los años 2006 y 2009 se mantuvo una calidad por debajo de los 200 mg/L en su mayoría, teniendo valores por encima de los 300 mg/L en algunos días (Figuras 4.18, 4.20, 4.23 y 4.26).

Los sólidos suspendidos totales también mostraron un efluente con resultados bastante desfavorables, comenzando en el 2002 donde el 22% de los datos disponibles no satisfacían los límites permisibles de la NOM-003, seguido por el incumplimiento del 90% de los datos de los años 2004, 2006 y 2009.



Tabla 4.5 – Promedio de la eficiencia anual de remoción en la fase uno

PARÁMETRO/AÑO	2002	2004	2006	2009
DBO5	Sin datos del efluente	Sin datos del efluente	84.87%	73.20%
DQO	64.74%	65.29%	70.20%	63.39%
SST	72.61%	69.37%	69.43%	71.03%

Ahora, analizando el influente y efluente de la PTARCA cuando el sistema BRM entró en operación, podemos observar con la poca información disponible de la DBO_5 que el influente tiene la mayor cantidad de datos entre 150 y 350 mg/L (Figura 4.28), mientras que el efluente satisfacía los límites permisibles de la NOM-003-SEMARNAT-1997 teniendo valores máximos de DBO_5 de 7 mg/L (Figuras 4.31 y 4.34).

En cuanto a la DQO, se tuvo un influente por debajo de los 800 mg/L en el año 2011, se incrementó a un rango de 900 a 1300 mg/L en el 2012 y tuvo un decremento interesante teniendo valores por debajo de los 1000 mg/L hasta julio del año actual (Figuras 4.29, 4.32 y 4.35). Debido a que la normatividad para la producción de agua tratada no incluye alguna restricción de descarga con respecto a este parámetro, se puede decir que los valores obtenidos son bastante aceptables dada la eficiencia de remoción promedio presentada en la Tabla 4.6.

En las Figuras 4.30, 4.33 y 4.36 podemos observar los resultados que conciernen a los sólidos suspendidos totales, en el año 2011 se mantuvo un influente por debajo de los 400 mg/L en su mayoría, el cual mantiene una tendencia de incrementar de 50 a 100 mg/L en los años subsecuentes. En cuanto al efluente, se observa una excelente calidad teniendo la mayoría de valores por debajo de los 5 mg/L en los años 2012 y 2013, satisfaciendo en su totalidad el límite permisible de 20 mg/L que indica la normatividad vigente.

Tabla 4.6 – Promedio de la eficiencia anual de remoción en la fase dos

PARÁMETRO/AÑO	2012	Hasta Julio 2013
DBO5	97.95%	Sin datos del influente
DQO	92.94%	93.78%
SST	99.63%	99.61%



La Tabla 4.6 confirma la excelente calidad de agua que produce un sistema BRM, teniendo una eficiencia de remoción por encima del 92% en los tres parámetros analizados. Comparando el sistema BRM con el sistema de lodos activados, discos biológicos rotatorios y filtro rociador, es evidente que el sistema BRM es mucho más eficiente en la remoción de estos tres parámetros. En resumen, el sistema BRM no sólo cumple con la normatividad vigente, sino también tiene la capacidad de tratar influentes con concentraciones mayores a aquéllas con las que operaban los tres sistemas, previos a la modernización, y producir agua con una calidad superior.



CAPÍTULO 5 – CONCLUSIONES

El propósito de esta tesis fue analizar el funcionamiento de la tecnología de reactores biológicos con membranas y describir su aplicación como proceso biológico en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Este análisis se logró con la información disponible de los proyectos de Cauley Creek y Ciudad Universitaria, presentando los diferentes resultados de calidad de agua obtenidos. Se realizó una descripción de que lo que son los reactores biológicos con membranas y su proceso como alternativa de solución para el tratamiento de aguas residuales municipales. También se describieron las diferentes configuraciones y principales características de las membranas que se utilizan normalmente para este tipo de sistemas. En los capítulos dos y tres se presentaron dos ejemplos del empleo de esta tecnología con los proyectos ya mencionados, describiendo diversos aspectos acerca de las etapas que recorrieron para su realización. Finalmente, se analizaron los datos de calidad del agua disponibles de los dos proyectos y se compararon con los sistemas que se tenían previamente instalados, por lo que se puede decir que los objetivos del presente trabajo se cumplieron satisfactoriamente.

La planta de Cauley Creek se expandió de una capacidad de 9,500 m³/d a una de 19,000 m³/d, cambiando de un proceso de remoción química a un proceso mejorado de remoción biológica de fósforo. Utilizando el programa BioWin para modelar y simular, se mostró que la configuración modificada de Johannesburgo era la mejor alternativa. Esta configuración requería únicamente una recirculación de licor mezclado y básicamente los mismos reactores que los que se tenían en la fase uno antes de la ampliación. Se amplió la planta para que tuviera el doble de su capacidad, donde se aprovechó la infraestructura existente instalando muros divisorios para convertir los trenes existentes en la configuración deseada. La ampliación de la planta comenzó operaciones en el 2004 y ha estado cumpliendo con todos los límites de descarga desde entonces con significativamente menor consumo de sustancias químicas.

Los resultados de la operación mostraron que las dosis de cloruro férrico y sosa cáustica se redujeron en un 60% con respecto a la fase uno. El promedio actual de la concentración del agua residual fue de 25 a 30% más baja que los valores de diseño utilizados en las simulaciones de BioWin, esto resultó en que las dosis de cloruro férrico y sosa cáustica actuales fueran 35% menores que las de los valores estimados mediante este software.

Además de consistentemente lograr que el fósforo total en el efluente esté por debajo de 0.1 mg/L, la planta también está alcanzando un nitrógeno total típico entre 4 y 5 mg/L en el efluente. Esto es un dato significativo debido a que la planta de tratamiento no tiene límites de nitratos ni de nitrógeno total por parte de los organismos reguladores.

Antes de la modernización de la PTARCA el subsistema más eficiente resultó ser el de discos biológicos rotatorios, seguido por el de lodos activados y filtro rociador. Debido al progresivo deterioro y cambio constante en la calidad del agua en el influente, los tres subsistemas de tratamiento dejaron de generar una calidad de agua aceptable de acuerdo con la normatividad vigente. El deterioro de equipos y la



producción de agua que no satisfacía las normas fueron unos de los principales factores por lo cual se tomó la decisión de modernizar los subsistemas de tratamiento existentes.

La elección del sistema de tratamiento para la modernización de la planta fue un sistema BRM gracias a que es un sistema que cumplía con los requerimientos de espacio y calidad del agua que se necesitaban. Se considera que la modernización mediante un sistema BRM fue una excelente solución al problema que se tenía, ya que aparte de presentar resultados de calidad de agua excelentes, también generó un ahorro en costos en infraestructura al aprovechar los reactores existentes y provoca menor impacto ambiental.

Al comparar el sistema BRM con los tres sistemas de tratamiento que antes estaban en operación, el sistema BRM resultó ser más eficiente en cuanto a la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y sólidos suspendidos totales, teniendo eficiencias de remoción superiores a cualquiera de los tres sistemas por separado y en conjunto y teniendo la totalidad de datos disponibles del efluente satisfaciendo la normatividad vigente.

Es importante mencionar que los sistemas BRM son una buena alternativa para solucionar problemas con restricciones de espacio y normas estrictas de calidad de agua como en el caso de los dos proyectos descritos en el presente trabajo.

Recomendaciones

Si en algún futuro la PTARCA llegara a tener una alimentación constante de agua cruda y una mayor demanda de agua tratada, se incrementaría de manera importante su capacidad de tratamiento si se agregara un tren de tratamiento biológico gemelo al existente actualmente, y de esta manera aparte de producir una mayor cantidad de agua de excelente calidad, también se podría dar mantenimiento a las membranas o al reactor de un tren mientras el otro opera, manteniendo así un efluente constante.

Una de las principales limitaciones de los sistemas BRM es el consumo y costo energético, se recomienda estudiar las implicaciones para contar con un sistema BRM operado con energías renovables con el fin de hacer este tipo de sistemas más competitivos con respecto a otros sistemas de tratamiento tradicionales.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Comisión Nacional del Agua. (2011). *Estadísticas del agua en México, edición 2011* [en línea]. México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-1-11-EAM2011.PDF> [2013, mayo 02]
- Velasco, A. & Solar, R. (2011). *Biorreactores de membrana: tecnología para el tratamiento de aguas residuales. La ciencia y el hombre* [en línea], 24(3). Disponible en: <http://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol24num3/articulos/membrana/> [2013, mayo 03]
- Hermanowicz, Slav W. (2011). *Membrane Bioreactors: Past, Present and Future?*. UC Berkeley: Water Resources Collections and Archives. Disponible en: <http://escholarship.org/uc/item/9293s8zw>
- Judd, S. (2006). *The MBR book, Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment* [en línea] Oxford: Elsevier. Disponible en: <http://books.google.com.mx/books?id=joSAwT0vUcMC&pg=PR5&lpg=PP1&dq=The+MBR+book+:+principles+and+applications+of+membrane+bioreactors+in+water+and+wastewater+treatment> [2013, mayo 11]
- Zeaman, Leos J., Zydney, Andrew L. (1996). *Microfiltration and Ultrafiltration, Principles and Applications*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Cid León, D. (2007). *Tratamiento de agua residual municipal mediante un biorreactor anaerobio de membrana a escala piloto*. Tesis de Maestría en ingeniería ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Disponible en: <http://132.248.9.195/pd2007/0619827/Index.html> [2013, junio 4]
- Siemens Water Technologies (2011). *Biological Wastewater Treatment*. Disponible en: http://www.water.siemens.com/en/applications/wastewater_treatment/biological-treatment/Pages/default.aspx [2013, junio 6]
- The membrane research environment (MemRE) (2011). *Pore size*. Disponible en: http://membranes.edu.au/wiki/index.php/Pore_Size [2013, junio 9]
- García Román, M. (2009). *Tratamiento de aguas residuales industriales, tratamientos específicos de vertidos industriales*. Disponible en: <http://www.ugr.es/~mgroman/archivos/TARI/teari-2.pdf>
- EPECO water and wastewater technologies. *MBR why? Membrane bioreactors against conventional activated sludge*. Disponible en: <http://www.epecombr.com/downloads/MBR%20why.pdf> [2013, junio 12]
- Koch membrane systems Inc. (2013). *Learning center: Membrane configurations*. Disponible en: <http://www.kochmembrane.com/Learning-Center/Configurations.aspx> [2013, junio 21]
- Judd, C. (2013). *The MBR site: Multitube & hollow fibre installations*. Disponible en: http://www.thembrsite.com/installations_multitube.php [2013, junio 23]
- Alfa laval (2000). *Flat sheet membranes: How it Works*. Disponible en: <http://www.alfalaval.com/solution-finder/products/flat-sheet-membranes/Pages/howitworks.aspx> [2013, julio 8]



- New Water Inc. (2007). *Membrane Bio-reactors (MBR) for Wastewater Treatment & Water Reclamation in the Caribbean*. Disponible en: <http://www.docstoc.com/docs/22899998/ZENON-Wastewater-Treatment-Reclamation-Systems>. [2013, junio 22]
- Fitzgerald, K. & TSG technologies Inc. (2008). *Membrane bioreactors*. Disponible en: http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/FITZGERALD%202008%20Membrane%20Bioreactors.pdf [2013, junio 25]
- Agua, servicios y suministros, S.A. (ASYSA) (2013). *Que debes saber sobre el agua, tabla del espectro de filtración*. Disponible en: <http://www.asysa.com.gt/que-debes-saber-sobre-el-agua/tabla-del-espectro-de-filtracion/> [2013, julio 15]
- Synder Filtration (2008). How it works: Membrane filtration and spiral wound membranes <http://www.synderfiltration.com/services/membrane-filtration-solutions/membrane-filtration-how-it-works> [2013, julio 19]
- Kraume, M. (2007). *Membrane Bioreactors*. Berlin University of technology, department of chemical engineering. Disponible en: http://www.zer0-m.org/phpatm/index.php?action=downloadfile&filename=TUB_MBR.pdf&directory=Zero-m%20Course%20-%20English/2_Sewage%20Treatment&PHPSESSID=bwgvycet. [2013, julio 28]
- Glynn, J. & Heinke, G. (1999). Recursos Hidráulicos. *Ingeniería ambiental (2) (pp. 354-361)*. México: Pearson Educación.
- Alcarria, M. (2011). Evaluación tecnológica de la aplicación de reactores biológicos de membranas en procesos de tratamiento de aguas residuales. Tesis de Maestría. Universitat Politècnica de Catalunya, España.
- Food and agriculture organization of the United Nations. (1992). Wastewater treatment and use in agriculture [en línea] Natural Resources Management and Environment Department. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/t0551e/t0551e05.htm> [2013, mayo 20]
- Dodson, D. (2008). Manager's Perspective: Chemical Addition to a Membrane Bioreactor for Low Total Phosphorus. In *WEFTEC 2008, Workshop W101-WEF/WERF: Demonstrated Processes for Limit of Technology Nutrient Removal: Achievable Limits and Statistical Reliability*.
- AQUAREC. (2006). *Water treatment options in reuse systems* [en línea]. Delf University of Technology. Disponible en: http://www.amk.rwth-aachen.de/fileadmin/user_upload/aquarec/WP7_D17_Water_treatment_options_in_reuse_systems.pdf [2013, mayo 23]
- Mahendraker, V. & Hribljan, M. (2009). *Design of advanced biological nutrient removal MBR processes – some considerations* [en línea]. In BCWWA 2009 annual conference. GE Water & Process Technologies. Disponible en: https://www.bcwwa.org/resourcelibrary/1315866525-20.03_HribljanH_Presentation.pdf
- Bott, C. B., Parker, D. S., Jimenez, J., Miller, M. W., & Neethling, J. B. (2012). WEF/WERF study of BNR plants achieving very low N and P limits: evaluation of technology performance and process reliability. *Water Science and Technology*, 65(5), 808. Disponible en: http://www.brownandcaldwell.com/Tech_Papers/1352%20-%20WEF-WERF%20Study%20of%20BNR%20Plants.pdf



- Stein, R. & Fiss, E. (2010). *Solving winter operation problems at biological wastewater treatment plants [en línea]*. AWARE Environmental, Inc. Disponible en: <http://infohouse.p2ric.org/ref/33/32178.pdf> [2013, mayo 23]
- Williams, R., Schuler, P., Comstock, K., & Pope, R. (2008). Large Membrane Bioreactors of Georgia A Guide and Comparison. *Proceedings of the Water Environment Federation, 2008*(1), 548-561. Disponible en: http://www.brownandcaldwell.com/Tech_Papers/1196-Williams-Large%20Membrane%20Bioreactors.pdf
- United States Environmental Protection Agency (1999). *Wastewater Technology Fact Sheet: Ultraviolet disinfection [en línea]*. Washington, DC: EPA office of water. Disponible en: http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2002_06_28_mtb_uv.pdf
- Barnard, J. L. (2006). Biological Nutrient Removal: where we have been, where we are going. *Proceedings of the Water Environment Federation, 2006*(13), 1-25. Disponible en: <http://www.environmental-expert.com/Files/5306/articles/8469/001.pdf>
- Radjenović, J., Matošić, M., Mijatović, I., Petrović, M., & Barceló, D. (2008). Membrane bioreactor (MBR) as an advanced wastewater treatment technology. In *Emerging Contaminants from Industrial and Municipal Waste* (pp. 37-101). Springer Berlin Heidelberg. Disponible en: http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloadaddocument/9783540792093-c1.pdf?SGWID=0-0-45-636003-p173844914
- Phagoo, D., Fry, D., Machisko, J., & Penny, J. (2005). ENHANCED BNR WITH MBR A UNIQUE COMBINATION. *Proceedings of the Water Environment Federation, 2005*(14), 1727-1741.
- World Media Group, LLC. (2013). *Duluth, GA weather*. Disponible en: <http://www.usa.com/duluth-ga-weather.htm> [2013, mayo 27]
- U.S. Geological Survey (USGS) (2013). *The Apalachicola-Chattahoochee-Flint (ACF) River National Water Quality Assessment (NAWQA) Program study*. Disponible en: <http://ga.water.usgs.gov/nawqa/basin/chattahoochee-basin.html> [2013, junio 5]
- Parkson (2010). *Rejilla fina Hycor Rotomesh; diseño confiable basado en rejilla rotoshear con filtro perforado*. Disponible en: <http://www.parkson.com/sites/default/files/documents/document-rotomesh-brochure-spanish-436.pdf> [2013, julio 24]
- Sulojeva, J., Percovs, A., Malukova, J., Urbane, V. (2011). *Scientific Journal of Riga Technical University: Operational Safety management aspects on municipal waste water treatment plant*. Disponible en: [2013, agosto 3]
- Santillana, M. (2011). *Postcard Geography, exploring the 50 states*. Disponible en: <http://minneolamustangs.com/geography/> [2013, junio 9]
- Engineering Design Technologies (EDT) (2009). *Cauley Creek Water Reclamation & Reuse Facility Georgia*. Disponible en: [http://www.edtinc.net/edt-v2/images/file/Cauley%20Creek%20Water%20Facility%20\(2\).pdf](http://www.edtinc.net/edt-v2/images/file/Cauley%20Creek%20Water%20Facility%20(2).pdf) [2013, julio 11]
- Fulton County (2010), JCEC information portal: *Vortexing Grit Removal*. Disponible en: <http://www.fultonec.com/Overview-Process-VortexingGrit.html> [2013, junio 16]
- Yiantsios, S., Andritsos, N., Karabelas, A. (2007). *Modern technologies for water and wastewater treatment: An overview of membrane technology in water treatment*. Aristotle University of Thessaloniki & University of Thessaly.



- Peeters, J. (2008). Nutrient removal with membrane bioreactor technology. POTW Nutrient reduction and efficiency workshop, Covington Kentucky.
- General Electric Water & Process technologies (GE) (2008). *ZeeWeed* 500D Module, immersed hollow-fiber ultrafiltration technology*. Disponible en: http://www.ge-energy.com/content/multimedia/_files/downloads/ZeeWeed%20500D%20Module.pdf [2013, junio 22]
- SEMARNAT. (2003). NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.-Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Disponible en:<http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1342/1/nom-004-semarnat-2002.pdf>
- Guerra Alvares, D. (1988). Comparación de las características de sedimentación de lodos producidos en dos sistemas de biodisco. Tesis de Maestría en ciencias. Universidad Autónoma de Nuevo León, México. Disponible en: <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020091176/1020091176.html>
- Guerrero, T., Rives, C., Rodríguez, A., Saldívar, Y. & Cervantes, V. (2009). El agua en la ciudad de México. Revista de ciencias de la UNAM [en línea], (94), pp. 16-24. Disponible en: http://www.revistaciencias.unam.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=203%3Ael-agua-en-la-ciudad-de-mexico&catid=43&Itemid=48 [2013, mayo 30]
- PUMAGUA. (2008). Informe final [en línea], pp.64-79. México: Instituto de Ingeniería UNAM. Disponible en: http://www.agua.unam.mx/assets/pumagua/informes/informe_PUMAGUA2008.pdf [2013, mayo 31]
- Portal de Estadística Universitaria (2000). *UNAM. Población escolar total 1970-2013*. Disponible en: http://www.estadistica.unam.mx/series_inst/ [2013, agosto 20]
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2012). *Anuario estadístico. Distrito Federal. Sistema para la Consulta de Anuarios Estadísticos de los Estados*. Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/sfi/detalle.aspx?c=265&upc=702825045944&s=est&tg=13&f=2&pf=Prod&ef=09&cl=0> [2013, agosto 2]
- Huber Technology (2011). *HUBER Vacuum Rotation Membrane VRM Bioreactor*. Disponible en: <http://www.huber.de/products/membrane-bioreactor-mbr/huber-vmr-bioreactor.html> [2013, junio 16]
- Camacho, A. (2011). *Filosofía de control para la planta de tratamiento de aguas residuales de la UNAM*. Aguas Latinas México, S. de R.L. de C.V.
- Huber Technology (2011). *HUBER COANDA Complete plant Ro 5C*. Disponible en: <http://www.huber-technology.com/products/screens-and-fine-screens/rotamatr-screens/coanda-complete-plant-ro-5c.html?L=eqmesrvpap%3FMP%3D7-1413> [2013, junio 16]
- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) (1999). *Folleto informativo de la tecnología de aguas residuales-Desinfección con cloro*. Disponible en: http://water.epa.gov/aboutow/owm/upload/2004_07_07_septics_cs-99-062.pdf [2013, junio 18]