



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA

EMPLEO DE BIODISCOS EN EL TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN UN EDIFICIO
DE CIUDAD UNIVERSITARIA

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL - AGUA

P R E S E N T A :

LUIS ANTONIO MATA AMARO



TUTOR:
DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA

México, D.F.

ENERO 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Moeller Chávez Gabriela Eleonora

Secretario: Dr. González Martínez Simón

Vocal: Dr. César Valdez Enrique

1^{er.} Suplente: Dr. Luna Pabello Víctor Manuel

2^{do.} Suplente: Dr. González Barceló Oscar

Lugar donde se realizó la tesis:

Departamento de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS:

Dr. Enrique César Valdez

FIRMA

A mi familia por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

A mis maestros por su gran apoyo y motivación para la culminación de nuestros estudios profesionales y para la elaboración de esta tesis; al Dr. Enrique César por su tiempo compartido y por impulsar el desarrollo de mi formación profesional; al Dr. José Sepúlveda Sánchez por su apoyo ofrecido en este trabajo en las instalaciones de la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa; a la Bióloga Natasha Karime por su asesoría en laboratorio.

A mis amigos por que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y que hasta ahora, seguimos siendo amigos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo otorgado a través de la beca para estudios de posgrado (Maestría) # 375970.

Todos aquellos familiares y amigos que no recordé al momento de escribir esto. Ustedes saben quiénes son.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
I.1.	ANTECEDENTES	1
I.2.	JUSTIFICACIÓN.....	4
I.3.	OBJETIVOS.....	4
I.4.	ALCANCES Y LIMITACIONES	5
II.	DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO Y DEL PROCESO DE TRATAMIENTO PROPUESTO.....	7
II.1.	LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EDIFICIO	7
II.2.	NORMAS OFICIALES MEXICANAS APLICABLES.....	9
II.3.	CONTACTORES BIOLÓGICOS ROTATORIOS (CBR).....	12
II.3.1.	HISTORIA	12
II.3.2.	FUNDAMENTOS DEL PROCESO	16
II.3.3.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO CBR.....	21
II.3.4.	CRITERIOS DE DISEÑO.....	23
III.	METODOLOGÍA	33
III.1.	METODOLOGÍA GENERAL.....	33
III.2.	PLANEACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO	34
III.2.1.	ESTUDIOS PRELIMINARES.....	37
III.3.	DISEÑO DE LAS UNIDADES DE LA PLANTA PILOTO	40
III.3.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO CBR.....	40
III.3.2.	CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA PILOTO	65
III.3.3.	RECOMENDACIONES DE OPERACIÓN	71
III.3.4.	ACTIVIDADES A REALIZAR DURANTE LA ETAPA DE OPERACIÓN	73
IV.	OPERACIÓN Y MONITOREO DE LA PLANTA PROTOTIPO	77
IV.1.	ARRANQUE DE LA PLANTA PROTOTIPO.....	77
IV.2.	OPERACIÓN DE LA PLANTA.....	78
IV.2.1.	SEGUNDO PERIODO ESCOLAR 2011 (NOVIEMBRE – DICIEMBRE).....	79

IV.2.2.	SEGUNDO PERIODO VACACIONAL 2011	83
IV.2.3.	PRIMER PERIODO ESCOLAR 2012 (ENERO – MARZO).....	85
IV.3.	ALTERNATIVAS AL MANEJO DE LODOS	96
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	103
V.1.	SEGUNDO PERIODO ESCOLAR 2011 (NOVIEMBRE – DICIEMBRE)	103
V.2.	SEGUNDO PERIODO VACACIONAL 2011	108
V.3.	PRIMER PERIODO ESCOLAR 2012 (ENERO – MARZO)	110
	CONCLUSIONES	115
	BIBLIOGRAFÍA	117
	ANEXO I.....	121
	ANEXO II	129
	ANEXO III	135
	ANEXO IV.....	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I-1. Plano de la red de alcantarillado del Conjunto Sur	3
Figura II-1. Izq. Ubicación del edificio y área de proyecto; Der. Punto de descarga original del edificio.	7
Figura II-2. Vista de planta del estado original de descarga	8
Figura II-3. Izq.-Mecanismo de operación y tanque séptico de agua residual. Der.- Placas de contacto y tanque Imhof de sedimentación.	13
Figura II-4. Fotografía de un sistema de CBR, Clermont County, Ohio.....	14
Figura II-5. (a) Contactor biológico rotatorio anaerobio (AnRBC). (b) PTAR diseñada y construida por <i>AQUATERSUM, S.A. de C.V.</i>	15
Figura II-6. Tren de tratamiento convencional con CBR.	16
Figura II-7. Funcionamiento de un biodisco.	17
Figura II-8. El desarrollo de una biopelícula descrito en cinco fases.....	19
Figura II-9. Mecanismos y procesos involucrados con la conversión y transporte de sustratos en biopelículas.	19
Figura II-10. Falla estructural del material de fijación.	22
Figura II-11. Flujo paralelo al eje.	24
Figura II-12. Flujo perpendicular al eje.....	24
Figura II-13. Paso del caudal de alimentación.	25
Figura II-14. Flujo de alimentación cónico paralelo al eje	25
Figura II-15. Esquema de un sistema biológico rotatorio de contacto.	28
Figura II-16. Relaciones de eficiencia y tasa de carga para biodiscos.	29
Figura III-1. Etapas generales del proyecto.....	33
Figura III-2. Diagrama de planeación de actividades para el proyecto de la planta de tratamiento piloto.....	35
Figura III-3. Hidrogramas de descarga del agua residual de la DICyG	39
Figura III-4. Curvas de volúmenes acumulados de agua residual generada por la DICyG.....	40
Figura III-5. Vistas y componentes del CBR prototipo	42
Figura III-6. Diagrama de flujo del sistema propuesto.....	47
Figura III-7. Vista en planta de las unidades de la planta piloto. Distribución propuesta originalmente	49
Figura III-8. Perfil hidráulico de la planta piloto	50
Figura III-9. Isométrico del tren de tratamiento de agua.....	51
Figura III-10. Dimensiones del sedimentador secundario	54
Figura III-11. Diagrama de proceso y balance de masa por componente de la planta piloto	56

Figura III-12. Obra de desvío del agua residual y cárcamo de bombeo	57
Figura III-13. Curva de balance volumétrico en el tanque de almacenamiento.....	58
Figura III-14. Curvas masa de entradas (azul) y salidas (rojo)	59
Figura III-15. Configuración del tanque de almacenamiento en la planta.....	59
Figura III-16. Izq. Componentes del biodigestor autolimpiable (Rotoplas®). Der. Corte transversal. ..	60
Figura III-17. Instalación del biodigestor en la planta piloto	61
Figura III-18. Vistas del biodisco de la planta piloto	62
Figura III-19. Configuración del tanque de sedimentación secundaria	63
Figura III-20. Instalación del tanque de sedimentación secundaria	64
Figura III-21. Vistas de la cisterna de almacenamiento del agua tratada	65
Figura III-22. Vista en planta de las unidades de la planta (distribución final) después de los ajustes propuestos en el capítulo III.4.....	67
Figura III-23. Perfil hidráulico de la planta piloto (elevaciones finales) después de los ajustes necesarios descritos en el capítulo III.4	68
Figura III-24. Sistema de tratamiento compacto HERVA modelo UH-1.5 (cortesía de SANDE Y DIAZ, SL).....	70
Figura III-25. Fotografías de la etapa de construcción del proyecto.	71
Figura IV-1. Representación del taponamiento en la válvula de alimentación principal.....	78
Figura IV-1. Curvas de descarga del segundo aforo.....	80
Figura IV-2. Comparación gráfica de curvas de descarga promedio de los aforos realizados	81
Figura IV-3. Rejilla del cárcamo de bombeo	82
Figura IV-4. Ajuste en la alimentación del sedimentador primario: Izq.- Original. Der.- Ajustado.....	84
Figura IV-5. Funcionamiento hidráulico de los ajustes realizados en el tanque de igualación	85
Figura IV-6. Censo de población por hora de la DICyG	87
Figura IV-7. Relación entre las curvas de descarga promedio y el censo de la DICyG	87
Figura IV-8. Izq.- Fotografía de un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB). Der.- Elementos principales de un microscopio electrónico de barrido.	89
Figura IV-9. Colocación de las muestras secas en las cápsulas de aluminio.....	89
Figura IV-10. Recubrimiento de las muestras en bajo vacío utilizando oro (sputtering)	90
Figura IV-11. Micrografías de la etapa 1.	93
Figura IV-12. Micrografías de la segunda etapa.....	94
Figura IV-13. Micrografías de la tercera etapa.	95
Figura IV-14. Diagrama de flujo general de tratamiento de lodos.	98
Figura IV-15. Diagrama de flujo típico para el tratamiento de lodos con digestión biológica y tres diferentes procesos de deshidratación.....	100
Figura IV-16. Alternativa de manejo de lodos propuesta para la planta piloto	101

Figura V-1. Izq- Diagrama de flujo de estabilidad del biodisco. Der- Diagrama de flujo en fines de semana y días de asueto	103
Figura V-2. Representación gráfica de los valores de remoción durante el segundo periodo escolar 2011	105
Figura V-3. Gráfica representativa de la remoción en el sedimentador primario	107
Figura V-4. Gráfica representativa de la remoción en el biodisco.....	107
Figura V-5. Diagrama de flujo en periodo vacacional con dilución de lodos	108
Figura V-6. Monitoreo del biodisco durante el segundo periodo vacacional 2011	109
Figura V-7. Representación gráfica de los resultados del monitoreo durante el primer periodo escolar 2012	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II-1. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos	10
Tabla II-2. Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros	11
Tabla II-3. Límites máximos permisibles de contaminantes.....	12
Tabla II-4. Lista de referencias que indican cargas admisibles para plantas con CBR	27
Tabla II-5. Información típica de diseño para un sistema CBR	28
Tabla II-6. Tasas de desnitrificación postanóxica en sistemas CBR sumergidos	29
Tabla II-7. Criterios de diseño.	31
Tabla III-1. Actividades generales y su programación correspondiente	36
Tabla III-2. Programación de actividades para el aforo y caracterización del agua residual.....	37
Tabla III-3. Caracterización del agua residual de la DICyG.....	38
Tabla III-4. Composición típica de agua residual doméstica cruda	38
Tabla III-5. Comparación de parámetros de diseño	46
Tabla III-6. Resumen del balance de masa en el tren de tratamiento de agua	55
Tabla III-7. Programación de obra de la planta piloto	69
Tabla III-8. Costos de inversión del proyecto	69
Tabla III-9. Actividades en la etapa de operación del sistema.....	74
Tabla III-10. Programa de análisis en laboratorio	75
Tabla IV-1. Segundo aforo de agua residual generada por la DICyG.....	80
Tabla IV-2. Fotografías de la biomasa durante el periodo vacacional	83
Tabla IV-3. Censo de población horario de la DICyG.....	86
Tabla IV-4. Límites permisibles para metales pesados en biosólidos	97
Tabla IV-5. Límites máximos permisibles para patógenos en lodos y biosólidos	97
Tabla IV-6. Aprovechamiento de biosólidos	98
Tabla IV-7. Procesos de tratamiento de sólidos	99
Tabla IV-8. Ventajas y desventajas de la digestión anaerobia en la estabilización de lodos	101
Tabla V-1. Tabla de registro de las pruebas correspondientes al segundo periodo escolar 2011	104
Tabla V-2. Remoción general durante el segundo periodo escolar 2011	104
Tabla V-3. Resultados obtenidos del sedimentador primario.....	107
Tabla V-4. Resultados obtenidos del biodisco	107
Tabla V-5. Monitoreo del biodisco durante la segunda temporada vacacional 2011	108
Tabla V-6. Resultados del monitoreo durante el primer periodo escolar 2012 (enero – marzo).....	111
Tabla V-7. Resultados del monitoreo durante el primer periodo escolar 2012	112
Tabla V-8. Valores de diseño y resultados promedio del monitoreo de cada elemento.....	114

RESUMEN

El objetivo de este proyecto fue planear, diseñar, construir e iniciar la operación hasta la estabilización de un sistema de tratamiento de aguas residuales a escala piloto, con base en el proceso de contactores biológicos rotatorios (biodiscos), para un edificio de oficinas; así como evaluar el funcionamiento del sistema en diferentes puntos del tren de tratamiento. En la etapa de planeación y diseño se realizó la caracterización y aforo del agua residual, se adquirió el equipo necesario para montaje del sistema de tratamiento, se elaboraron planos y se definieron actividades a corto plazo. La etapa de construcción duró aproximadamente tres meses, el valor estimado de la obra fue de \$86,255.00. La estabilización del sistema duró aproximadamente cuatro semanas y la operación se dividió en dos periodos: escolar y vacacional, de acuerdo al calendario de la UNAM. En cuanto al primer periodo escolar, donde no operó el sedimentador secundario, se obtuvieron remociones promedio de materia orgánica como demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 61%, demanda química de oxígeno (DQO) de 39% y de sólidos suspendidos totales (SST) de 64%. En el periodo vacacional se evaluó uno de los tres posibles diagramas de operación descritos en el manual de operación con el objetivo de mantener la estabilización del sistema (biodisco) a fin de evitar una segunda etapa de arranque. Los resultados no fueron satisfactorios al existir desprendimientos severos de biopelícula, por lo que se descarta este diagrama de operación. El segundo periodo escolar monitoreado en el que se incluyó la operación del sedimentador secundario se obtuvo una remoción de materia orgánica como DBO de 59%, DQO de 67% y SST de 46%. Los resultados también se muestran por cada elemento del sistema. Además, se realizó un estudio de la biopelícula en el biodisco con base en microscopía electrónica de barrido identificando bacilos, cocos, espirilas, vibrios, bacterias filamentosas, hongos, protozoarios e insectos. Según las pruebas correspondientes no se detectaron huevos de helminto. También se propone un tren de tratamiento de lodos con base en la bibliografía.

ABSTRACT

The objective of this project was to plan, design, construct and begin operation until the stabilization of a system of wastewater treatment pilot scale, based on the process of rotating biological contactors (biodiscs), for an office building, so to evaluate system performance at different points of treatment train. In the planning and design stage was the characterization and waste water capacity, the necessary equipment was purchased for installation of the treatment system, were developed plans and defined short-term activities. The construction phase lasted approximately three months, the estimated value of the work was \$ 86,255.00. The stabilization of the system lasted about four weeks and the operation is divided into two periods: school and vacation, according to the calendar of the unam. On the first school term, which did not operate the secondary settler, average removals were obtained organic matter such as biochemical oxygen demand (BOD) of 61%, chemical oxygen demand (COD) of 39% and total suspended solids (TSS) of 64%. In the vacation period was assessed one of three possible operating diagrams described in the operating manual with the aim of stabilizing the system hold (biodisk) to avoid starting the second stage. The results were not satisfactory to exist severe detachments of biofilm, which is discarded at this timing chart. The second school term monitored which included the operation of secondary settler was obtained organic matter removal of 59% as BOD, COD and TSS of 67% from 46%. The results are also shown for each system element. Furthermore, a study of biofilm biodisk based on scanning electron microscopy identifying bacilli, cocci, espirilas, vibrios, filamentous bacteria, fungi, protozoa and insects. As supporting evidence no helminth eggs were detected. It also proposes a sludge treatment train based on the literature.

I. INTRODUCCIÓN

La importancia que tiene el tratamiento de agua en temas sociales se debe principalmente al incremento de la demanda de agua y a su escasa disponibilidad en zonas urbanas y excesivamente pobladas, que afectan al mismo tiempo a las zonas rurales de donde se extrae este recurso para sustentar a las primeras, generando un problema social cuya solución cada día se torna más complicada.

Entre las medidas para enfrentar la problemática mencionada está el uso de tecnologías para el tratamiento de agua y agua residual que favorezcan la disponibilidad del recurso, permitan un desarrollo comunitario sustentable y cumplan con la normatividad aplicable. En suma, la solución se debe proponer de manera integrada con las necesidades que se pretenden satisfacer y que ayuden a mitigar el impacto que tiene toda actividad humana.

I.1.ANTECEDENTES

Con base en el *Programa de manejo, uso y reúso del agua en la UNAM (PUMAGUA)*, la Facultad de Ingeniería a través de la División de Ingenierías Civil y Geomática (DICyG) integró un grupo de trabajo con el propósito de desarrollar una metodología y procedimientos para el análisis de los microsistemas de uso y manejo del agua en los inmuebles propiedad de la UNAM, y la aplicación de dicha metodología a manera de prueba piloto para el análisis de los sistemas de suministro y evacuación de agua en los inmuebles de la Facultad. El estudio fue denominado *Evaluación cualitativa y cuantitativa del suministro y evacuación del agua en los edificios de la Facultad de Ingeniería*, el informe final se concluyó en diciembre de 2008.

Dicho proyecto, encomendado al Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la DICyG, consideró la evaluación de la calidad del agua en los puntos de consumo y de descarga de aguas residuales que se generan en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería, así como el análisis de las condiciones de operación de los sistemas, prácticas y tecnologías actuales de uso, tratamiento y reúso, en su caso, o de disposición final, de acuerdo con los objetivos del PUMAGUA.

La revisión de las condiciones de operación de los sistemas de suministro y evacuación del agua mostró la necesidad de contar con un levantamiento exhaustivo de las instalaciones que permitió identificar todos los sitios de cada inmueble donde se usa y descarga agua, los cuales fueron

ubicados en los planos, y posteriormente sujetos a un proceso de *auditoría del agua*, con el propósito de conocer las características de sus residuos líquidos que pudieran causar impacto adverso a los sistemas de evacuación y tratamiento de aguas residuales y al ambiente.

La última fase del proyecto consistió en proponer dispositivos tecnológicos y prácticas adecuadas para el uso eficiente del agua, y un informe de los hallazgos de la *auditoría del agua* en laboratorios y talleres, que permitirán aplicar las normas oficiales mexicanas en la materia y buenas prácticas de ingeniería para el manejo adecuado de las sustancias y residuos líquidos.

Los albañales de los edificios del Conjunto Norte o Principal drenan hacia el colector localizado en el límite norte del conjunto (entre la parte posterior de los laboratorios y Las Islas). Dicho colector de concreto tiene un diámetro de 60 cm y pendiente de 26 milésimas. El sitio de vertido de estas aguas residuales es la Planta de Tratamiento de CU localizada en la avenida Cerro del Agua (Programa de manejo, 2008).

Las aguas residuales del Conjunto Sur se manejan de varias formas. Los albañales de los edificios de la División de Ciencias Básicas drenan hacia un colector de concreto de 30 cm de diámetro y 10 milésimas de pendiente, ubicado al norponiente (siguiendo el trazo del antiguo Camino Verde). El sitio de vertido de estas aguas residuales también es a la Planta de Tratamiento de CU. Sin embargo, los albañales de los edificios de construcción reciente, como son la Biblioteca Enzo Levi, los edificios de la Secretaría de Posgrado e Investigación y el edificio de la División de Ingenierías Civil y Geomática, vierten en tanques sépticos (algunos sin mantenimiento), en el mejor de los casos, o en pozos negros, por lo que las aguas residuales se infiltran directamente a través de las grietas de la roca basáltica (Figura I-1). En estos edificios se tienen establecidos los laboratorios de Mecánica de Suelos, Ingeniería Ambiental, Electromecánica, Petrolera y Termofluidos, además de los sanitarios existentes. Dichos laboratorios vierten directamente sus residuos líquidos en el sistema de evacuación de aguas residuales de los edificios, por lo que en la actualidad se efectúa la infiltración de residuos peligrosos en el subsuelo de manera intermitente.

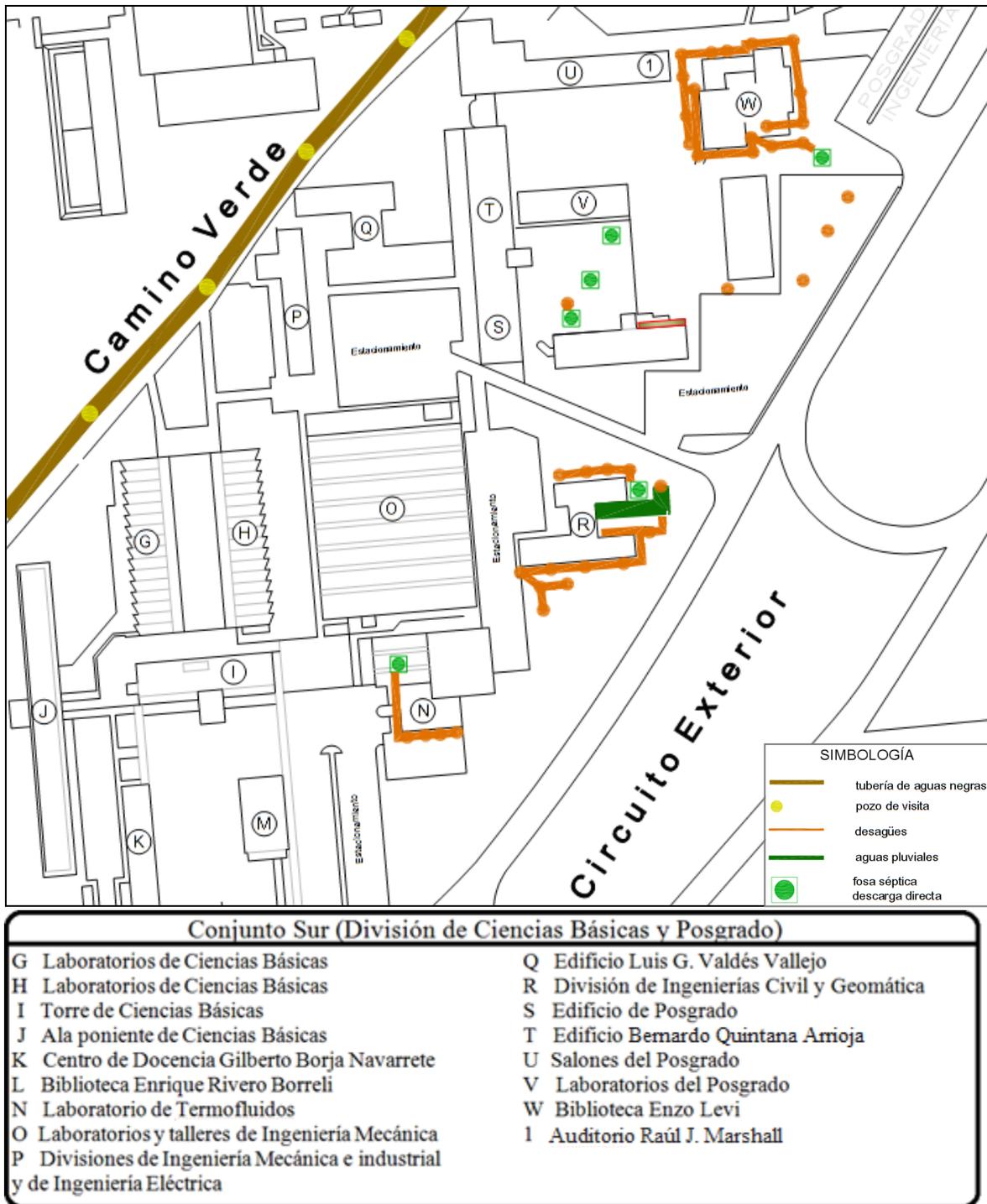


Figura I-1. Plano de la red de alcantarillado del Conjunto Sur

Fuente: (Guzmán, 2010)

I.2.JUSTIFICACIÓN

Como alternativa a la construcción de los colectores que permitan conducir el agua residual de la zona sur del campus a la Planta de Tratamiento de CU, está la del manejo descentralizado de los residuos líquidos, mediante pequeñas instalaciones de tratamiento por cada edificio o grupo de edificios, con lo cual se evitarían los costos de la excavación en roca para la construcción de alcantarillas así como los impactos ambientales que se producirían por las obras en un área ya urbanizada y con uso intensivo.

En virtud de lo anterior y como consecuencia del estudio citado, el Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental estudia la factibilidad del manejo descentralizado de aguas residuales en los inmuebles de la Facultad de Ingeniería del Conjunto Sur que carecen de conexión a la red de alcantarillado. Los resultados obtenidos en el presente trabajo se integrarán al estudio de factibilidad del proyecto.

La División de Ingenierías Civil y Geomática dispone de un CBR utilizado en proyectos de investigación en 1988 y almacenado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería. Dicha unidad cuenta con área superficial de 23 m². Como parte de la presente tesis se realizaron las actividades necesarias para establecer y operar una planta de tratamiento piloto para las aguas residuales del edificio de la División, de características similares a las de tipo oficinas. La meta a largo plazo es que, al lograr la estabilización del proceso de tratamiento, se pueda sustituir el agua potable suministrada a mingitorios e inodoros del edificio por agua tratada y, con los resultados de esta experiencia, se pueda intervenir en los restantes edificios de la Facultad de Ingeniería que actualmente disponen el agua residual de manera ambientalmente inadecuada.

I.3.OBJETIVOS

Objetivo general

Planear, diseñar, construir e iniciar la operación hasta la estabilización de un sistema de tratamiento de aguas residuales, con base en el proceso de contactores biológicos rotatorios, para un edificio de oficinas; así como evaluar el funcionamiento del sistema en diferentes puntos del tren de tratamiento.

Objetivos específicos

Determinar los datos básicos para el diseño del sistema de tratamiento y efectuar los trabajos de campo y laboratorio para conocer la aportación per cápita y características de las aguas residuales del edificio.

Diseñar y construir la planta piloto de tratamiento de aguas residuales.

Operar y monitorear la planta piloto durante seis meses.

Aplicar microscopía electrónica de barrido para observar los tipos de microorganismos que prevalecen en cada etapa del biodisco y comparar con lo reportado en la bibliografía.

Proponer alternativas para el manejo de los lodos generados.

Redactar un manual de operación y mantenimiento del sistema.

I.4.ALCANCES Y LIMITACIONES

El proyecto objeto de la presente tesis, con carácter de aplicación práctica directa, tiene como alcances efectuar las obras y actividades así como el arranque de la operación de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales, el seguimiento del sistema hasta su estabilización y observar los requerimientos de funcionamiento satisfactorio en condiciones reales, con los siguientes fines:

- Mejorar la calidad del agua residual generada en el edificio, para evitar que se disponga en el subsuelo rocoso del sitio del proyecto.
- Contar con la operación de una planta de tratamiento en condiciones reales dirigido a estudiantes de licenciatura y especialización para el logro de diversos objetivos de aprendizaje.

Aunque no forma parte de los alcances de esta tesis, se pretende que a mediano plazo se diseñen y construyan las instalaciones para que pueda sustituirse el suministro de agua potable a inodoros y mingitorios del edificio, por agua tratada.

No es objetivo de este trabajo la proposición o desarrollo de un modelo matemático que describa el rendimiento del biodisco; sin embargo, se emplean algunos de los encontrados en la bibliografía consultada, únicamente con fines de diseño o comparativos.

Por motivos presupuestales y de prevención de olores, no se efectuará el tratamiento de los lodos producidos. Las purgas se dispondrán en un pozo de visita de la red de alcantarillado de CU.

A largo plazo, el proyecto considera la implantación del sistema de tratamiento en otros edificios de la Facultad de Ingeniería, en función de la viabilidad mostrada por los resultados de este trabajo, tomando en cuenta las particularidades de cada caso.

Los levantamientos de campo, aforo, muestreo y análisis de laboratorio de muestras de agua residual que incluye el presente documento se refieren únicamente a las instalaciones sanitarias del edificio de la DICyG.

II. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO Y DEL PROCESO DE TRATAMIENTO PROPUESTO

II.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EDIFICIO

El edificio de la División de Ingenierías Civil y Geomática se encuentra en la zona sureste del campus central de Ciudad Universitaria formando parte del denominado *Conjunto Sur*, cuenta con tres niveles, cada uno con un área de construcción de aproximadamente 800 m², la distribución de espacio es la misma en los niveles superiores: 32 cubículos, salas de usos múltiples, área secretarial y baños; en planta baja, se encuentran laboratorios de cómputo, gabinete de topografía, área secretarial y área de intendencia. La descarga de sus aguas residuales se lleva a cabo en una grieta o pozo de absorción (Figura II-2) ubicada en la zona verde existente entre la parte posterior del edificio y el circuito universitario, usando únicamente una fosa séptica instalada en 1987, que carece de mantenimiento.

El subsuelo en esta zona es principalmente de tipo basáltico y la infiltración ocurre entre las grietas existentes en las rocas. No existen estudios geológicos de la zona que describan el comportamiento geohidrológico del escurrimiento o infiltración, por lo que se desconoce el impacto ambiental de la acción descrita. Las características del agua de desecho corresponden a las de un edificio de oficinas en el que no existen laboratorios u otro tipo de actividades. El horario de uso es de 7:00 a 21:00 horas y se cuenta con dos periodos vacacionales al año, cada uno de tres semanas (diciembre y julio). La planta de tratamiento piloto se construyó en el exterior del edificio en un área jardinada cerca del punto de descarga original del agua residual (Figura II-1).



Figura II-1. Izq. Ubicación del edificio y área de proyecto; Der. Punto de descarga original del edificio.
Fuente: Imágenes ©2012 GeoEye. Datos del mapa ©2012 Google, INEGI

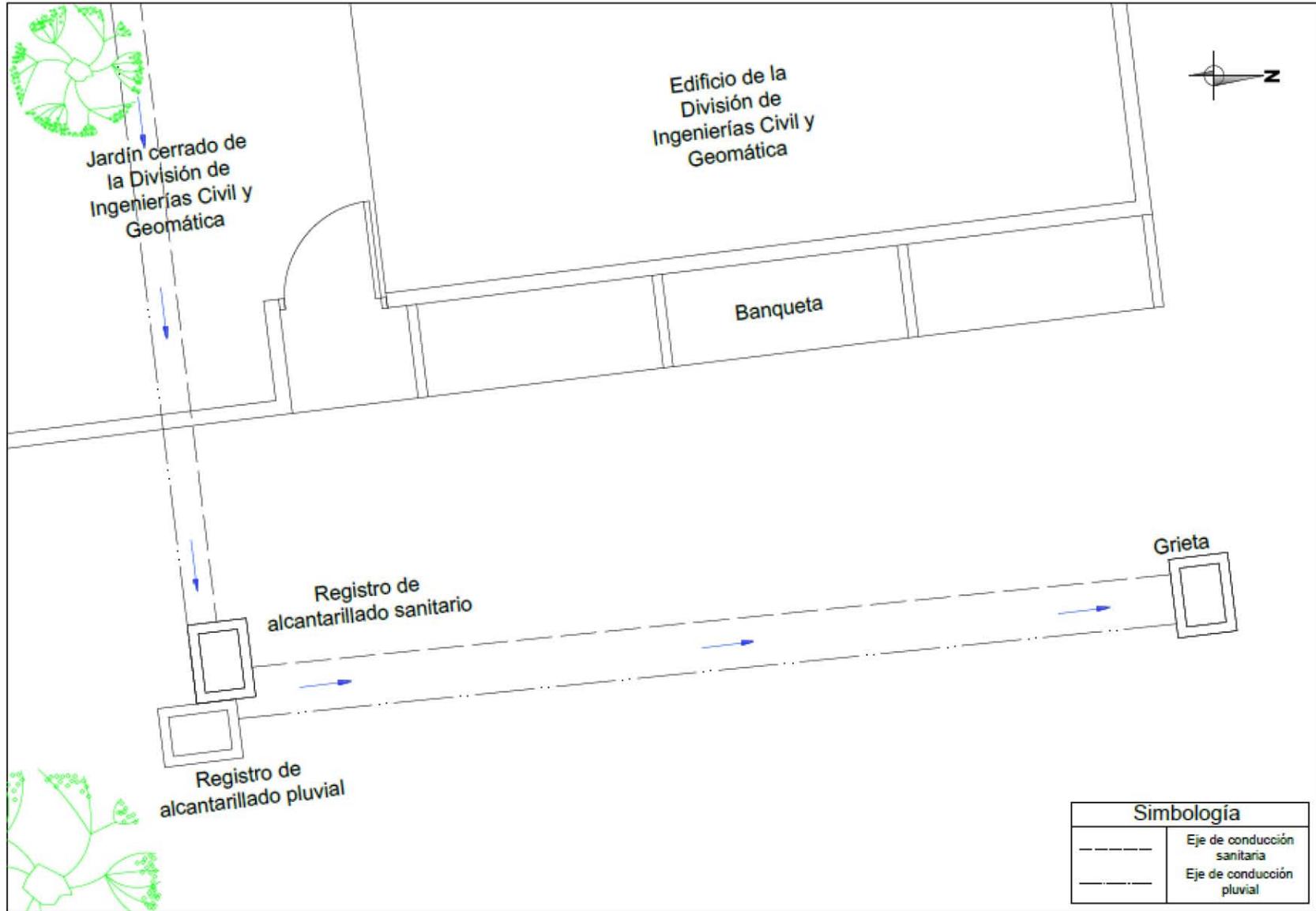


Figura II-2. Vista de planta del estado original de descarga

II.2. NORMAS OFICIALES MEXICANAS APLICABLES

De acuerdo a la investigación bibliográfica realizada no existen, como tales, límites permisibles de contaminantes en descargas a pozos de absorción. Sin embargo, la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales consignados en la Tabla II-1 y Tabla II-2. Esta norma considera al suelo con uso agrícola como cuerpo receptor, por lo que se tomarán en cuenta estos límites permisibles de contaminantes para este proyecto.

En la Tabla II-1 se puede observar que la mayoría de contaminantes básicos correspondientes al vertido al suelo tienen la clave NA (No Aplicable), y restringe únicamente la cantidad de grasas y aceites. En la Tabla II-2 se muestran los valores límite para metales pesados y cianuros; sin embargo, no existe fuente generadora de dichos contaminantes en el edificio. También se observa que la NOM-001-SEMARNAT-1996 indica un rango permisible del potencial de hidrógeno (pH) de 5 a 10 unidades.

Una vez que se haya estabilizado la planta piloto y que se cumplen con los límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-1996 se enfocará el proyecto en el reúso del agua tratada en los sanitarios del edificio. En esta etapa, la calidad del agua está sometida a los valores consignados en la NOM-003-SEMARNAT (Tabla II-3) referidos al reúso en servicios al público con contacto directo.

Tabla II-1. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS

PARÁMETROS	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO		HUMEDALES NATURALES (B)		
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)				
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40
Grasas y Aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	
Materia Flotante (3)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2	
Sólidos Suspendidos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A.	N.A.	75	125	
Demanda Bioquímica de Oxígeno ₅	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150	
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	

(1) Instantáneo

P.D.= Promedio Diario;

(A),(B)(C): Tipo de Cuerpo Receptor (Ley Federal de Derechos)

(2) Muestra Simple Promedio Ponderado

P.M. = Promedio Mensual;

(3) Ausente según el Método de Prueba definido en la NMX-AA-006.

N.A. = No es aplicable.

Fuente: (SEMARNAT, 1997)

Tabla II-2. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS Y CIANUROS

PARÁMETROS (*)	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO		HUMEDALES NATURALES (B)	
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)			
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.		
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1	0.2
Cianuros	1.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4.0	6.0
Cromo	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

(*) Medidos de manera total.

P.D. = Promedio Diario

P.M. = Promedio Mensual

N.A. = No es aplicable

(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos

Fuente: (SEMARNAT, 1997)

Tabla II-3. Límites máximos permisibles de contaminantes

TIPO DE REUSO	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes Fecales NMP/100 ml	Huevos de Helminto (h/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	1,000	≤ 5	15	30	30

Fuente: (SEMARNAT, 1998)

II.3. CONTACTORES BIOLÓGICOS ROTATORIOS (CBR)

En este apartado se aborda el marco teórico del proceso de tratamiento denominado *contactor biológico rotatorio* o *biodisco*®, ya que el sistema de tratamiento a nivel secundario propuesto se basa en dicho proceso, que presenta ventajas sobre el de lodos activados, como son su bajo requerimiento de energía y mantenimiento (López, 2003).

De acuerdo con Metcalf & Eddy, las instalaciones con base en CBR han presentado problemas a lo largo de su historia debido al inadecuado diseño mecánico y a la falta de comprensión de los procesos biológicos. Las fallas son principalmente estructurales en los ejes y discos a causa de un desarrollo excesivo de la biopelícula. Además, que la complejidad en las características físicas e hidrodinámicas requiere que el diseño del proceso CBR se realice con base en información fundamental de la planta piloto y la información de campo.

II.3.1. HISTORIA

El primer contactor biológico rotatorio (CBR) fue desarrollado en Alemania por Weigand en 1900, cuya patente describe un cilindro formado de tablillas de madera. Sin embargo, no se construyeron más unidades hasta la década de 1930 cuando Bach e Imhoff lo probaron como sustituto para el tanque Emscher. Estas unidades experimentaron severos problemas debidos a obstrucciones en las tablillas, por lo que las investigaciones no continuaron.

En los Estados Unidos se reporta la invención de la *rueda biológica* por Maltby en 1929, que consistía en una serie de ruedas de paletas giratorias. En el mismo año Doman reporta sus ensayos con placas de acero rotatorias (Figura II-3). No obstante que no fueron empleados para el tratamiento de aguas residuales, esta fue la primera vez que los discos fueron investigados como medios de contacto, pero los resultados no fueron satisfactorios y se dejaron las investigaciones (Doman, 1929).

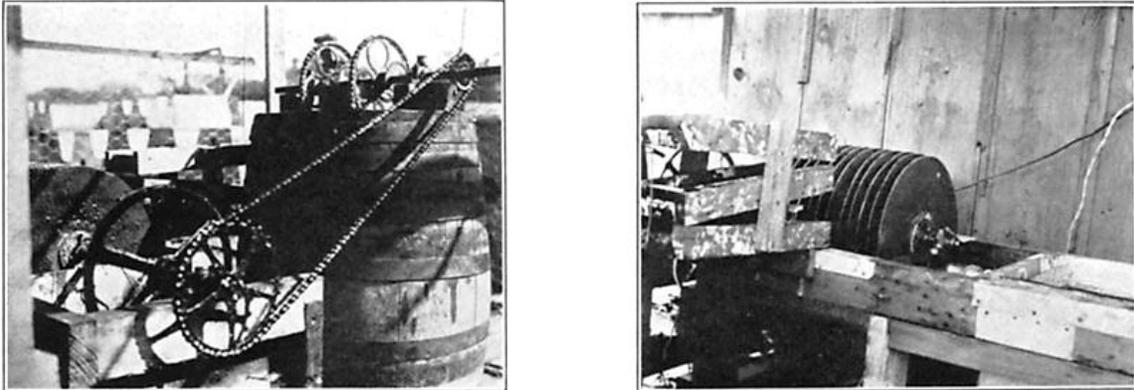


Figura II-3. Izq.-Mecanismo de operación y tanque séptico de agua residual. Der.- Placas de contacto y tanque Imhof de sedimentación. Fuente: (Doman, 1929)

Nada había sido desarrollado en Europa hasta finales de 1950 cuando primero Hartman y después Popel, en la Universidad de Stuttgart, realizaron pruebas exhaustivas usando discos de plástico de 1.0 m de diámetro. Casi al mismo tiempo el poliestireno expandido se empezó a usar como un material de construcción barato. Con este nuevo material el trabajo desarrollado por Hartman y Popel concluyó en un nuevo proceso de tratamiento de aguas residuales (Metcalf & Eddy, 2004).

En 1957, la compañía J. Conrad Stengelín en Tuttlingen, Alemania, comenzó a fabricar discos de poliestireno expandido de 2 y 3 m de diámetro para el uso en plantas de tratamiento de aguas residuales. La primera instalación comercial entró en operación en 1960, y su uso se extendió rápidamente en toda Europa por su simplicidad y bajo consumo de energía. En 1980 existían 1,000 instalaciones localizadas principalmente en Alemania, Suiza y Francia, las demás se encuentran en Italia, Austria, Gran Bretaña y Escandinavia. La mayoría de estas instalaciones son para poblaciones menores a 1,000 habitantes, sólo había unas cuantas instalaciones con capacidad de hasta 10,000 habitantes. Aunque ofrece gran simplicidad en su operación y bajos consumos de energía, el sistema de discos de poliestireno ha sido restringido a pequeñas instalaciones debido a los altos costos de construcción en comparación con el proceso de lodos activados (Solorio, 1988).

En el inicio de los años sesenta, en EUA, la división de investigación de la compañía Allis-Chalmers analiza el uso de discos rotatorios para diversas aplicaciones en procesos químicos. El procedimiento se denominó *Contactador de dos fases* (TPC) y fue utilizado para absorción de gases, extracción líquido-líquido, transferencia de masa y, eventualmente, para estudiar la transferencia de oxígeno. Durante el verano de 1965, se evaluó un sistema con discos de 1 m de diámetro en la planta de Jones Island en Wisconsin. Fundamentalmente, se utilizó el equipo para la transferencia de oxígeno dentro de un proceso de aireación; luego, fue probado sin recirculación y con biomasa adherida (como un *reactor biológico de contacto*). Experimentos posteriores confirmaron los resultados favorables de estas pruebas. El proceso fue designado como *Rotating Biological Contactador*, RBC (Alleman, 1982).

En 1968, se establece un acuerdo de licencia entre la compañía Allis-Chalmers y los fabricantes alemanes para efectuar la producción, venta y distribución en EUA. Se vende el proceso con el nombre comercial de *Bio-Disc*. La primera instalación comercial entró en operación en Estados Unidos para una pequeña fábrica de queso en 1969 (Solorio, 1988).

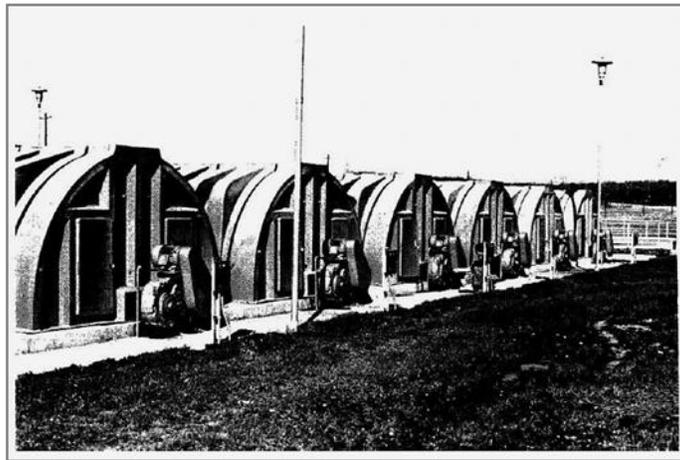


Figura II-4. Fotografía de un sistema de CBR, Clermont County, Ohio. Fuente: (Brenner, 1984)

En 1970, Allis-Chalmers vende la tecnología del RBC a la Corporación Autotrol. El proceso aún no era competitivo debido al alto costo del poliestireno. Sin embargo, en 1972 Autotrol anuncia el desarrollo de un nuevo material de soporte construido con hojas corrugadas de polietileno. La densidad de área superficial ($52.5 \text{ m}^2/\text{m}^3$ del disco de poliestireno) aumenta a $121 \text{ m}^2/\text{m}^3$ con el nuevo material (Alleman, 1982).

En la década de los 90, Friedman y Tait (Figura II-5) desarrollaron investigaciones con sistemas de biodiscos anaerobios (AnRBC) con aguas de alta concentración cuyo principal objetivo fue comprobar las condiciones en las cuales microorganismos metanogénicos y no-metanogénicos se desarrollan exitosamente en la superficie de discos rotatorios, además, el desarrollo de modelos para la predicción de remoción de sustratos orgánicos solubles en función de la tasa de alimentación (Tait & Freidman, 1980). Estos estudios incluyeron el aprovechamiento del gas metano producido como fuente de energía de la unidad CBR.

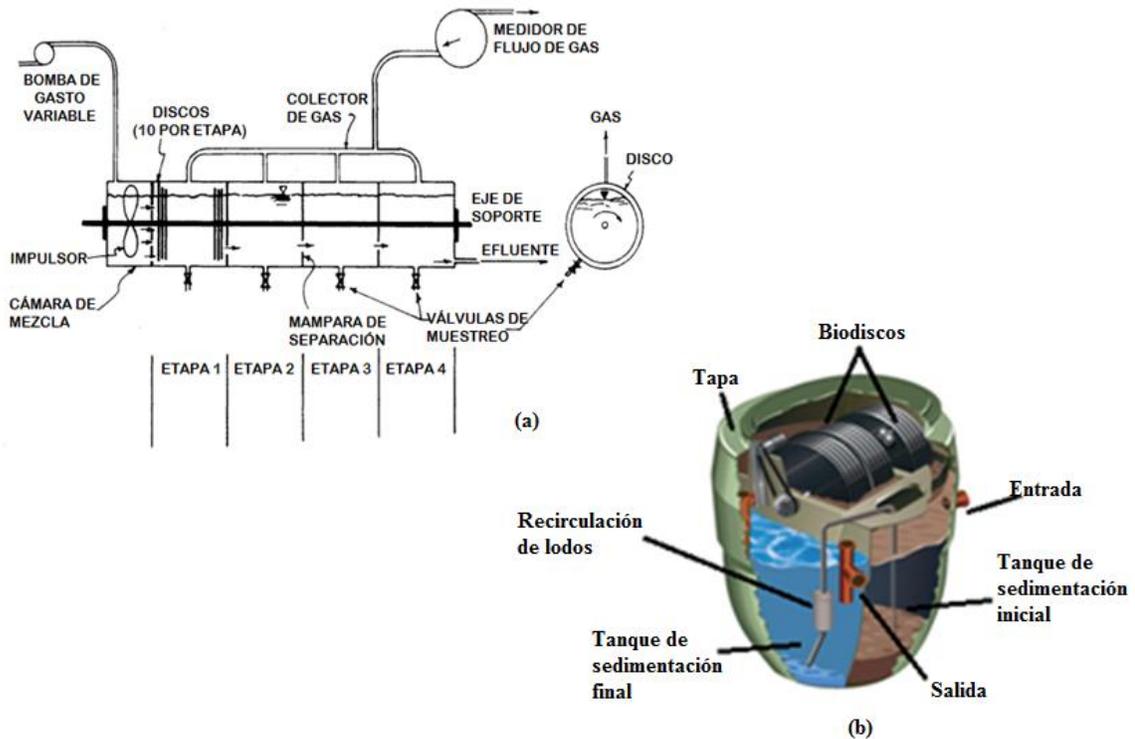


Figura II-5. (a) Contactor biológico rotatorio anaerobio (AnRBC) Fuente: (Tait & Freidman, 1980). (b) PTAR diseñada y construida por AQUATERSUM, S.A. de C.V.

Durante los años de 1980 a 2000 se desarrollaron estudios exhaustivos de aplicación de sistemas de CBR en aguas residuales municipales e industriales, sobre todo en la remoción de nutrientes, realizándose modificaciones de diseño y registrando su respectiva eficiencia. Las tendencias europeas actuales de este sistema se enfocan a la integración de sistemas compactos con altos valores de superficie de contacto, desarrollándose distintas patentes (Figura II-5) que proporcionan tratamiento desde 10 a 10,000 habitantes equivalentes. En Alemania y Suiza el empleo de discos rotatorios está ampliamente extendido en las plantas de tratamiento pequeñas. En EUA este tipo de plantas ha sido usado en plantas de todos los tamaños durante los años 70 (Henze et al, 2002).

En México, de acuerdo con el *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación* (CONAGUA, 2010), al concluir el año 2010 el registro de plantas en operación fue de 2,186 instalaciones, con una capacidad instalada de 126,847 L/s y caudal tratado de 93,600 L/s, equivalentes al 44.8% del agua residual generada y colectada en los sistemas municipales de alcantarillado del país. Del total de agua residual tratada, sólo el 0.35% (331.5 L/s) involucra el sistema de biodiscos en 9 instalaciones. Cabe mencionar que, aun cuando el número de plantas de tratamiento con base en biodiscos aumentó con respecto al 2009, el caudal de aguas residuales tratadas resulta menor, pues en el año anterior se tenían registradas 8 plantas con un caudal de agua residual tratada de 464 L/s (CONAGUA, 2009), es decir, algunas instalaciones dejaron de operar el sistema de biodiscos.

II.3.2. FUNDAMENTOS DEL PROCESO

El funcionamiento de un sistema de tratamiento con biodiscos es simple (Figura II-6), consiste básicamente en un sedimentador primario, donde se remueven las partículas más grandes por gravedad; posteriormente el agua pasa a un reactor de contactores biológicos rotatorios, que es un proceso de tratamiento basado en la formación de biomasa fija; y finalmente se cuenta con un sedimentador secundario para la separación de sólidos del agua.

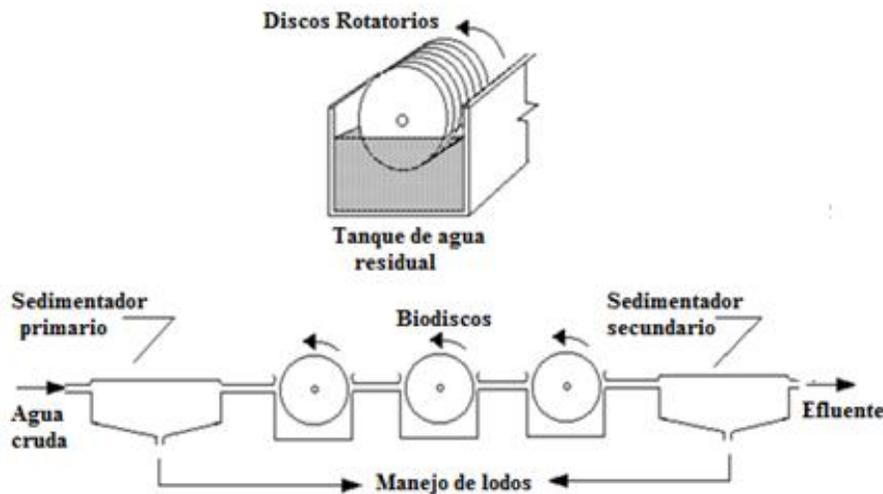


Figura II-6. Tren de tratamiento convencional con CBR. Adaptado de (Autotrol Corporation, 1978)

Sin embargo, cuando se cuenta con baja concentración de sólidos sedimentables se suele omitir el sedimentador primario, dejando que el arreglo de biodiscos y su funcionamiento proporcionen un efluente con buenas características de sedimentación.

Los principios involucrados en los contactores biológicos rotatorios son los mismos que corresponden a todo proceso biológico de tratamiento. Los microorganismos crecen en un ambiente aerobio controlado, mientras que el desecho y las sustancias carbonáceas son consumidas en su catabolismo.

La característica fundamental del biodisco es que los microorganismos están adheridos a la superficie del disco, el cual está parcialmente sumergido en el agua residual. Los discos de medio hidrofóbico preferentemente, están colocados en una flecha horizontal montada sobre un eje apoyado en un tanque y se encuentran sumergidos aproximadamente en un 40% del área superficial total del biodisco. Los microorganismos presentes en el agua residual comienzan a fijarse y multiplicarse en la superficie de los discos, mismos que se cubren con una película biológica de 2 a 4 mm de espesor (Benefield, 1980) (Dilim & Neelima, 2004). Durante la rotación, el reactor se impregna con una película de agua residual, la cual absorbe oxígeno del aire para que los organismos de la película biológica fijos a los discos puedan realizar su metabolismo y remover la materia orgánica soluble en el licor dentro del reactor. El suministro de oxígeno y la remoción de la materia orgánica se efectúa mientras el sistema de discos continúe girando a través del agua residual contenida en el tanque (Figura II-7). Las fuerzas de fricción ejercidas sobre la película biológica provocan que el exceso de biomasa se desprenda de los discos. Esto evita la producción excesiva de la película biológica manteniéndola con un espesor casi constante que es función del sustrato removido y de la velocidad de rotación. La rotación del sistema mantiene en suspensión a la biomasa desprendida hasta que el flujo de agua la lleva fuera del reactor para su separación posterior por sedimentación.

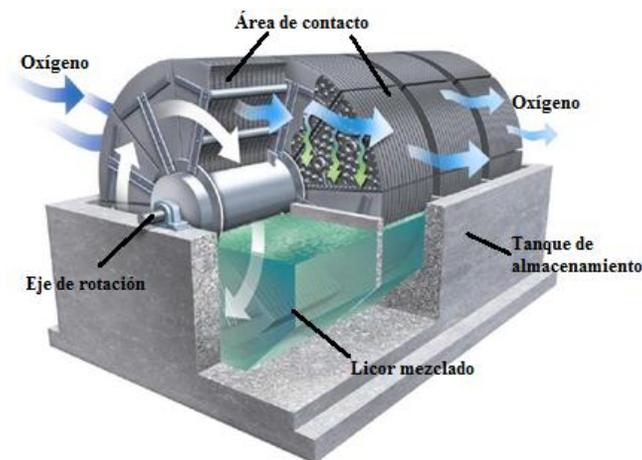


Figura II-7. Funcionamiento de un biodisco. El sistema de rotación proporciona contacto del medio entre el licor y el oxígeno del aire. El escurrimiento por gravedad a través del área de contacto garantiza su recubrimiento hasta la zona cercana al eje. La configuración morfológica de los discos cambia según el fabricante, en este caso los discos se componen de ocho secciones unidos por estructuras internas además del eje de rotación. Fuente: www.walker-process.com

La rotación del sistema cumple los siguientes propósitos (Solorio, 1988):

1. Proporcionar contacto vigoroso entre la película y el agua residual.
2. Mantener en condiciones aerobias el sistema
3. Ayudar a la distribución uniforme del oxígeno y del sustrato soluble en la biomasa.
4. Crear un medio mecánico para establecer un equilibrio de la biomasa de organismos adheridos a los discos y la que se encuentra en suspensión en el licor del reactor.
5. Mantener el reactor biológico en condiciones propicias para la difusión de los gases.

El proceso de película fija se basa en la capacidad de crecimiento de distintos microorganismos en superficies (Mara & Horan, 2003). Los investigadores difieren en cuanto al número de fases para la formación de la biopelícula variando entre tres (Weismann et al, 2007) y cinco etapas (Lasa, 2006), sin embargo, la descripción del desarrollo en ambos casos es homogénea al concluir todos en una fase terminal de estabilidad. De acuerdo con Waismann et al (2007), en la primera fase las macromoléculas son adsorbidas en la superficie limpia en los primeros segundos de contacto (proteínas, polisacáridos, lignina), porque son transportadas más rápido que los microorganismos desde el líquido del tanque a la superficie sólida. Como consecuencia de esta adsorción, se reduce la cobertura de la superficie con agua. Durante la segunda fase, se unen a esta superficie preparada algunas células microbianas por secreción de polímeros o flagelos. Regularmente no forman capas cerradas de espesor uniforme, sino pequeñas colonias fijas, que pueden extenderse por crecimiento y adherencia. Comúnmente a estos microorganismos se les suministra sustrato y oxígeno, y son capaces de desarrollarse de acuerdo a su tasa máxima de crecimiento. Durante este proceso, las células producen moléculas orgánicas que se difunden a través de la pared celular y de polímeros extracelulares catalizados por exoenzimas. Estos polímeros extracelulares son necesarios para la formación de una biopelícula estable (Wingender & Flemming, 1999). En la tercera fase la biopelícula puede integrarse de bacterias y polímeros extracelulares, donde el espesor de la misma está en función de la tasa de crecimiento y depende de la estabilidad de la biopelícula y las fuerzas cortantes del flujo del agua.

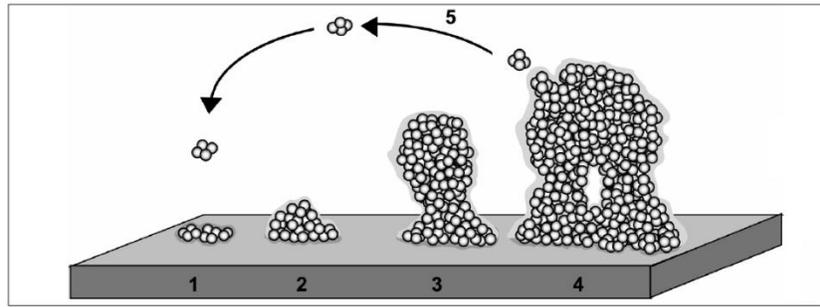


Figura II-8. El desarrollo de una biopelícula descrito en cinco fases. Fase 1: Fijación inicial de células a la superficie; fase 2: producción de la matriz de exopolisacárido extracelular; fase 3: desarrollo temprano de la arquitectura de la biopelícula; fase 4: maduración de la arquitectura de la biopelícula; fase 5: dispersión de células bacterianas desde la biopelícula. Adaptado de Lasa, 2006.

De acuerdo con Von Sperling (2007), el proceso de conversión metabólica tiene lugar en la biopelícula. El transporte de sustratos ocurre por procesos de difusión, inicialmente a través de la película líquida en la interfase líquido/biopelícula y posteriormente a través de la biopelícula. Los productos de las reacciones de oxidación y reducción son transportados en dirección opuesta, hacia el exterior de la biopelícula (Figura II-9). El sustrato donador de electrones, así como el receptor, deben penetrar la biopelícula para que se lleve a cabo la reacción bioquímica. En muchos sistemas aerobios la tasa de transferencia de oxígeno hacia las células es el factor limitante que determina la tasa de conversión biológica. La disponibilidad de oxígeno para los microorganismos depende de la solubilidad y transferencia de masa, así como de la velocidad a la que se utiliza el oxígeno disuelto. En reactores de biopelícula para tratamientos de efluentes anaerobios, el mecanismo de transporte involucra oxígeno y nitrógeno amoniacal (O_2 y $N-NH_4^+$), además de los productos intermedios ($N-NO_2^-$) y finales del nitrógeno ($N-NO_3^-$) hacia el medio líquido.

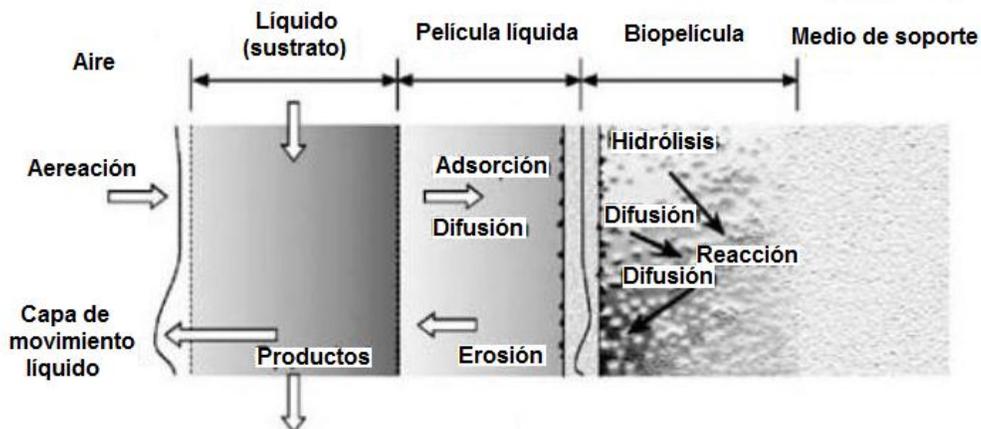


Figura II-9. Mecanismos y procesos involucrados con la conversión y transporte de sustratos en biopelículas. Adaptado de Von Sperling, 2007

Las etapas principales involucradas son:

- Transferencia de oxígeno en fase gaseosa al medio líquido
- Transferencia de oxígeno, amoníaco y nitratos en fase líquida hacia la biopelícula
- Transferencia de oxígeno, amoníaco y nitritos hacia el interior de la biopelícula
- Transferencia de productos intermediarios (N-NO_2^-) y productos finales (N-NO_3^-) hacia el medio líquido

El mismo autor menciona que el oxígeno, siendo poco soluble en el agua, con frecuencia se convierte en el factor limitante en un proceso aerobio con biopelícula (Von Sperling, 2007).

Microbiología en los contactores biológicos rotatorios

En un proceso de biopelícula fija los microorganismos están sujetos a un material de soporte donde alcanzan relativamente altas concentraciones. Como material se puede usar grava, piedras, plástico, arena o partículas de carbón activado. Existen dos factores importantes en el material de soporte que influyen en el desarrollo microbiano, el gasto del agua residual y la configuración geométrica de las partículas.

Bitton (2011) menciona que en el caso de los CBR, la biopelícula desarrollada en los discos alcanza espesores de 1 – 4 mm, comprende una compleja y diversa comunidad microbiana formada por eubacterias, bacterias filamentosas, protozoos y metazoos. Comúnmente se observan organismos filamentosos como *Sphaerotilus*, *Beggiatoa*, *Nocardia*, y algas filamentosas como *Oscillatoria* (Hittlebaugh & Miller, 1981). Estudios realizados por microscopía electrónica de transmisión muestran que *Sphaerotilus* contiene muchas inclusiones de poli- β -hidroxibutirato, indicador de almacenamiento de excesos de carbono por la bacteria. Estas inclusiones pueden constituir del 11 a más del 20 por ciento del peso seco de estas bacterias. En un caso de estudio, utilizando microscopía electrónica de barrido se mostró que la biopelícula de un CBR estaba compuesta por dos capas: una exterior de color blancuzco conformada por filamentos de *Beggiatoa* y otra capa interna negra (debido a la precipitación de sulfuro ferroso) contenía *Desulfovibrio*, una bacteria reductora de sulfatos (Alleman et al, 1982).

- *Zona anaerobia*. En esta capa, la bacteria fermentativa genera productos finales (ácidos orgánicos, alcoholes) usados por las bacterias reductoras de sulfatos.
- *Zona aerobia*. El sulfuro de hidrógeno producido por las bacterias reductoras de sulfatos en la zona anaerobia se difunde dentro de la zona aerobia, y es fácilmente utilizado por la bacteria *Beggiatoa* como donador de electrones. El H_2S es oxidado hasta su forma elemental (Bitton, 2011).

La sucesión de los organismos en la superficie del CBR es similar a la observada en lodos activados y se describe de la siguiente forma (Kinner & Curds, 1989). La colonización bacteriana está seguida por protozoos flagelados y pequeñas amibas → bacterívoros ciliados libres (*Colpidium*) → nemátodos → ciliados pedunculados (*Vorticella*) → rotíferos. Después de alcanzar un determinado espesor, la biopelícula se desprende y el material desprendido llega a la sedimentación final.

Las primeras etapas de un CBR remueven mayormente materiales orgánicos (DBO) mientras que las etapas subsecuentes remueven NH_4 como resultado de la nitrificación, cuando la DBO es lo suficientemente baja. Las bacterias oxidantes de amoníaco no pueden competir con el rápido crecimiento de las oxidantes de materia orgánica (Bitton, 2011). Von Sperling, 2007 menciona que para el caso de sistemas con nitrificación, la tasa crítica entre las concentraciones de oxígeno (O_2) y nitrógeno amoniacal (NH_4^+), que determina el sustrato limitante, es entre 0.3 y 0.4. Esto hace al oxígeno el sustrato limitante en el mayor de los casos. Suponiendo, por ejemplo, una concentración de 2 mg/L de oxígeno en la fase líquida del reactor, la concentración limitante de amoníaco será de 0.6 mg/L. En el caso de la oxidación simultánea de materia orgánica y nitrificación, la competencia por el oxígeno entre bacterias heterótrofas y autótrofas (nitrificantes) determina la estructura de la biopelícula. Cuando la tasa O_2/DQO es muy pequeña, la biopelícula es totalmente dominada por bacterias heterótrofas y no se lleva a cabo la nitrificación.

II.3.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO CBR

Ventajas

Las principales ventajas del proceso CBR sobre otros tipos de tratamiento biológico de aguas residuales son el bajo consumo de energía y la simplicidad de operación y mantenimiento; además, es posible diseñar fácilmente unidades para aumentar su capacidad en el futuro. El proceso no necesita recircular los lodos desde el sedimentador secundario, con lo cual se ahorran las bombas de recirculación y la tubería correspondiente, lo que da como resultado que el control del proceso sea muy simple (González & Elías, 1990).

El biodisco no es afectado negativamente por fluctuaciones hidráulicas, ya que tiene una capa de microorganismos adherida. Esta es una característica muy importante del proceso, sobre todo cuando se trata de aguas residuales de una industria o de una instalación para fines recreativos.

Debido a que se trata de un sistema de película fija los sólidos en el efluente presentan una buena capacidad de sedimentación, lo que deriva en un tanque de sedimentación relativamente menor que un sistema convencional de cultivo suspendido (López, 2003).

Comparado con otros procesos de película fija, es posible afirmar que el biodisco retiene una película biológica que se utiliza efectivamente en toda el área de contacto. Además, no es necesario lavar el disco para eliminar el exceso de biomasa, ya que no hay acumulación.

El proceso de biodiscos carece de los problemas de aerosol y ruido que se presentan en todos los sistemas de lodos activados. Cuando se tratan aguas de desecho con agentes tensoactivos, se tiene el problema de la espuma, el cual es más severo en el sistema de lodos activados (sobre todo en el aireado mecánicamente) que en el de biodiscos. El sistema admite bajas temperaturas exteriores, siempre y cuando se mantenga una temperatura del agua residual mayor a 13°C para evitar problemas de desprendimiento de biopelícula (González & Elías, 1990).

En virtud de que el volumen del tanque no es una variable de proceso, los tanques son de pequeñas dimensiones, a nivel de planta de tratamiento convencional, considerando una instalación completa y con poco requerimiento de terreno para un tratamiento secundario. Además, se han usado sistemas de CBR instalados como complemento a otros sistemas de tratamiento, demostrando ser eficaces (Seoánez, 2004).

Desventajas

Desde el punto de vista de mecánica de materiales, una de las principales desventajas de los biodiscos es que el diseño del sistema debe ser riguroso, pues se han registrado varios casos de rompimiento del material de fijación (Figura II-10) y desanclaje de la flecha que soporta los discos por una acumulación excesiva de biomasa (Martínez & Rodríguez, 2005).



Figura II-10. Falla estructural del material de fijación. Fuente desconocida

Debido a la falta de comprensión de los procesos biológicos en este sistema, la aplicación de modelos matemáticos empíricos se encuentra restringido a sistemas CBR con las mismas características físicas y condiciones operacionales y ambientales similares a las correspondientes al estudio experimental para el que fue desarrollado el modelo (Romero et al, 2004).

La nitrificación puede causar problemas de acidez, lo que llevaría al diseño de una fuente alterna para controlar el pH (González & Elías, 1990).

Otra desventaja es su poca capacidad para remover fósforo, dicha incapacidad se encuentra justificada por el funcionamiento del sistema (no hay condiciones anaerobias) que lo hace dependiente de adecuaciones en la planta que permitan la remoción de este nutriente o bien, mediante precipitación química.

El costo de inversión es mayor que para sistemas convencionales, además, se comportan de manera casi lineal con respecto a los caudales de agua por tratar, lo cual no sucede en otros sistemas convencionales (González & Elías, 1990).

II.3.4. CRITERIOS DE DISEÑO

De acuerdo con Metcalf & Eddy (2004), el diseño de un sistema de CBR debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Número de etapas de las unidades de CBR
- b) Criterios de carga
- c) Características del efluente
- d) El diseño de un sedimentador secundario

Etapas de CBR. Se refiere a la compartimentación de los discos del CBR que definen una serie de celdas independientes. Con base en la transferencia de masa y los principios de cinética biológica, las mayores tasas de remoción de sustrato se producirán en las zonas de mayor concentración del mismo. La aplicación típica del proceso de CBR consiste en cierto número de unidades operando en serie. El número de etapas depende de los requerimientos de calidad final del agua, para remover DBO se usan de dos a cuatro etapas y de seis o más para el proceso de nitrificación. Las etapas pueden lograrse usando compartimentos en un solo tanque o con el uso de tanques en serie separados, con esto se provocan condiciones donde distintos organismos pueden crecer

gradualmente de etapa a etapa. El desarrollo gradual en cualquier etapa depende principalmente de la materia orgánica del agua residual. Debido a que el agua residual fluye a través del sistema, cada etapa subsecuente recibe un afluente con una concentración más baja que en la etapa anterior.

Metcalf & Eddy (2004) también indican que para plantas pequeñas, los ejes de soporte de los biodiscos se encuentran paralelos a la dirección del flujo con grupos de discos separados por paredes delgadas (Figura II-11).

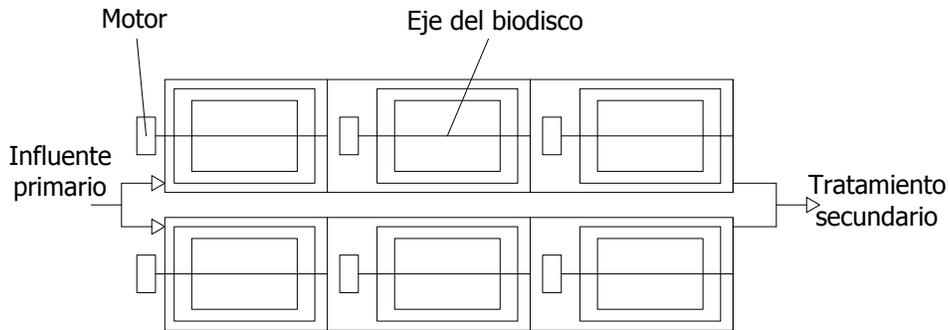


Figura II-11. Flujo paralelo al eje. Adaptado de Metcalf & Eddy, 2004

En grandes instalaciones los ejes se encuentran perpendiculares al flujo con varias etapas en serie para formar un tren de tratamiento (Figura II-12).

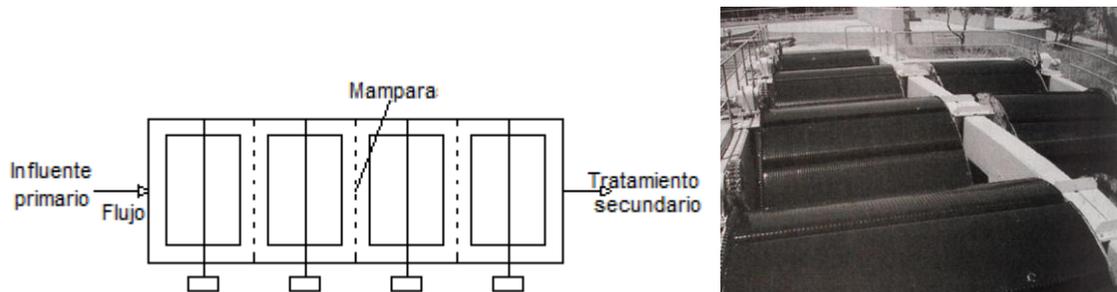


Figura II-12. Flujo perpendicular al eje (Metcalf & Eddy, 2004)

Para manejar las cargas en las primeras unidades, se puede usar un paso de alimentación (Figura II-13) o un sistema triangular (Figura II-14). Se deben usar dos o más trenes de flujo paralelos permitiendo así que las unidades puedan estar aisladas para mantenimiento.

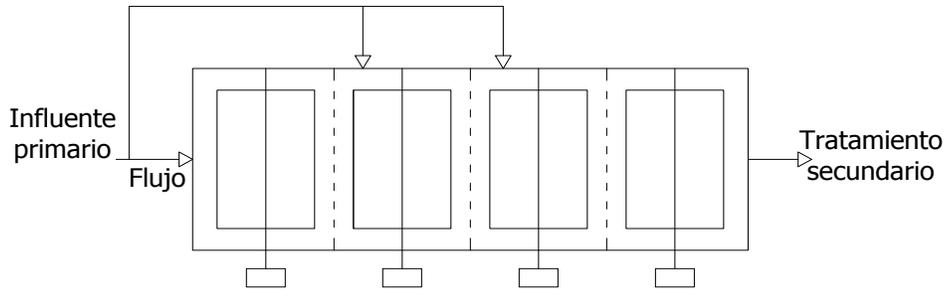


Figura II-13. Paso del caudal de alimentación. Adaptado de Metcalf & Eddy (2004)

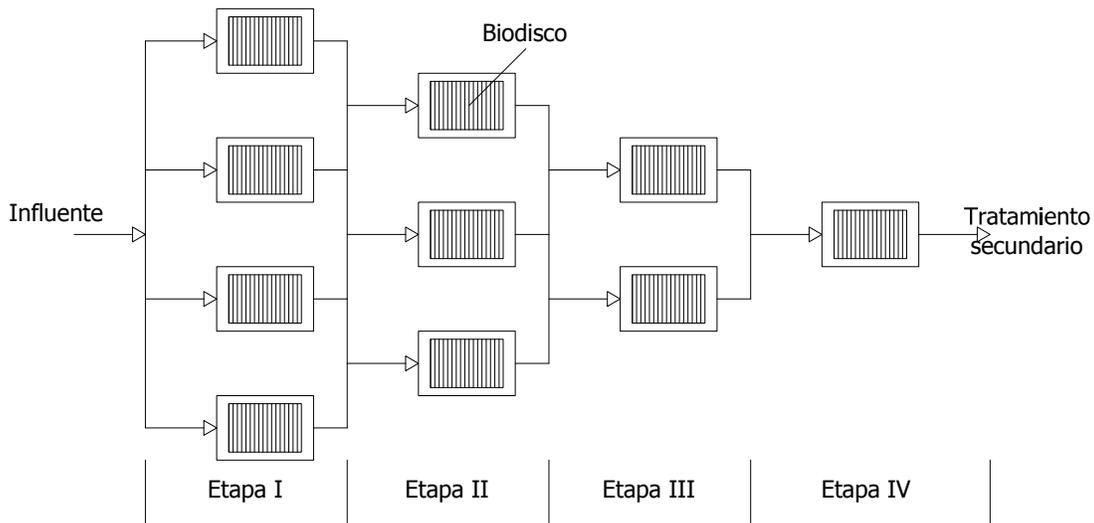


Figura II-14. Flujo de alimentación cónico paralelo al eje (Metcalf & Eddy, 2004)

Criterio de carga de biodiscos. En los estudios realizados a principios de los años sesenta, se utilizó la carga hidráulica como criterio fundamental de diseño, definida por la ecuación:

$$CH = \frac{Q}{A} \quad \text{Ecuación II-1}$$

Donde

CH = Carga hidráulica ($\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ s}$)

Q = Gasto (m^3/s)

A = Área superficial (m^2)

pues se pensaba que la cinética de eliminación de contaminantes era de primer orden (González & Elías, 1990). En la práctica no existe una curva única de porcentaje de eliminación contra carga hidráulica, sino que hay una curva para cada concentración de contaminantes en el influente; por tanto, es evidente que la concentración de materia orgánica tiene un efecto directo en la eficiencia del proceso.

En investigaciones posteriores se demostró la importancia de la concentración de material orgánico en el influente y se empezó a utilizar el concepto de carga orgánica, el cual involucra el gasto, la concentración de contaminantes y el área superficial (González & Elías, 1990). De manera cuantitativa, la carga orgánica se define como:

$$CO = \frac{Q \cdot S_0}{A} \quad \text{Ecuación II-2}$$

Donde

CO = Carga orgánica (g/s m²)

Q = Gasto (m³/d)

S₀ = Concentración de sustrato (g/m³)

A = Área superficial (m²)

Se observó que el rendimiento de un CBR está relacionado con la tasa de carga, superficie total y el oxígeno disuelto para la remoción de DBO y NH₄-N para la nitrificación. Para un tratamiento exitoso, la tasa de carga debe estar dentro de la capacidad de transferencia de oxígeno del sistema. Cuando la demanda de oxígeno excede la capacidad de transferencia del mismo se originan problemas tales como bajos rendimientos, olores y desprendimiento de biopelícula. Si se manejan tasas de carga orgánica altas se debe poner atención en el espesor de la biopelícula, ya que se han dado casos en los que su crecimiento es tal que daña estructuralmente el soporte del biodisco (Figura II-10).

Bajo estas mismas condiciones de sobrecarga existen condiciones anaerobias en el fondo de la película adherida. En la primera etapa los olores son el problema más frecuente causado por la excesiva carga orgánica.

Algunas de las tasas de carga para discos rotatorios son muy buenos ejemplos para mostrar cuan diferentes pueden ser dichas cargas. La Tabla II-4 Lista revisiones de referencias de EUA y europeas que han resultado en cargas recomendadas (Henze et al, 2002). Se observa claramente que no hay acuerdo y que la variación es bastante considerable (5 a 26 g DBO/m² d). También se observa que los valores más optimistas son los proporcionados por compañías fabricantes de equipo.

El control de la biopelícula sobre los discos rotatorios es regulado por la velocidad rotacional, que comúnmente se establece como un requerimiento de una velocidad periférica sobre los discos de no menos de 0.3 m/s. A esto debe agregarse un requerimiento mínimo de distancia entre los discos que comúnmente se establece de 1.5 a 2.5 cm.

Tabla II-4. Lista de referencias que indican cargas admisibles para plantas con CBR

Carga recomendada g DBO/ (m ² d)	Año	Referencias
14	1974	Steels
8.5	1978	Murphy & Wilson
26	1976	Autotrol Corp.
13	1977	Envirodisc Corp
4.9	1974	Ontario Ministry of Environment
8 - 10	1980	Abwassertechnische Vereinigung

Aplicable para aguas residuales domésticas a 15°C aproximadamente para obtener una concentración en el fluente de 15 gDBO/m³ o menor. La DBO del influente se basó en mediciones diurnas. Fuente: (Henze et al, 2002)

Debido a que la DBO soluble es consumida rápidamente en la primera etapa de un sistema de CBR, muchas compañías encargadas de su fabricación especifican cargas en un rango de 12 a 20 g de DBO soluble/m²d para la primera etapa. Asumiendo un 50 por ciento de DBO soluble, la tasa de carga de DBO total es de 24 a 30 g DBO/m²d. Para algunos diseños esto implica aguas residuales concentradas, el criterio de carga se cumple con la distribución del flujo a múltiples unidades de CBR en la primera etapa o usando un paso de alimentación como se muestra en la Figura II-13.

Las principales variables que afectan la nitrificación en los sistemas CBR incluyen las concentraciones de nitrógeno y materia orgánica en el influente, la concentración de oxígeno disuelto, la temperatura del agua residual, el pH y la alcalinidad, y la variación del caudal (WEF & ASCE, 1992). Para la nitrificación, el diseño de biodiscos puede ser muy similar al utilizado para un tratamiento terciario de nitrificación con filtros percoladores después de que la concentración de DBO soluble es agotada en las unidades de CBR anteriores a la etapa de nitrificación. La máxima tasa de superficie de remoción de nitrógeno que se ha observado es cercana a 1.5 g N/m²d (Metcalf & Eddy, 2004). Las bacterias nitrificantes probablemente son más sensibles a los niveles de oxígeno disuelto que las bacterias heterótrofas. Para la nitrificación el nivel mínimo de oxígeno disuelto varía entre 0.5 y 4.0 mg/L; sin embargo, un valor común es de 2.0 mg/L (WEF & ASCE, 1992).

Características del influente. El sistema de tratamiento con biodiscos puede ser diseñado para tratamientos a niveles avanzados o como un tratamiento secundario. Los biodiscos pueden proporcionar tratamientos combinados para DBO y nitrógeno amoniacal, o para proporcionar nitrificación independiente de una corriente secundaria. Las tasas típicas de las características de un efluente están indicadas en la Tabla II-5. Se han usado biodiscos sumergidos totalmente para la desnitrificación de aguas residuales después de un proceso anóxico mostrando buen rendimiento a escala piloto. La tasa de desnitrificación usando un CBR sumergido se muestra en la Tabla II-6.

Tabla II-5. Información típica de diseño para un sistema CBR

Parámetro	Unidades	Nivel de tratamiento		
		Remoción de DBO	Remoción de DBO y nitrificación	Nitrificación separada
Carga hidráulica	m^3/m^2*d	0.08 - 0.16	0.03 - 0.08	0.04 - 0.10
Carga orgánica	$g\ DBOs/m^2*d$	4 - 10	2.5 - 8	0.5 - 1.0
	$g\ DBO/m^2*d$	8 - 20	5 - 16	1 - 2
Carga orgánica máxima en la 1ª etapa	$g\ DBOs/m^2*d$	12 - 15	12 - 15	-
	$g\ DBO/m^2*d$	24 - 30	24 - 30	-
Carga de NH_3	$g\ N/m^2*d$	-	0.75 - 1.5	-
Tiempo de retención hidráulico	H	0.7 - 1.5	1.5 - 4	1.2 - 3.0
DBO del efluente	mg/L	15 - 30	7 - 15	7 - 15
NH_4-N del efluente	mg/L	-	< 2	1 - 2

Adaptado de Metcalf & Eddy, 2004

En algunos diseños se añade aire en la parte inferior del tanque para proveer oxígeno y hacer girar los discos, cuando éstos se encuentran equipados con dispositivos para capturar el aire (Figura II-15). Con el paso de los años se han desarrollado varias plantas pequeñas compactas que usan discos CBR. También se han desarrollado sistemas CBR para el tratamiento biológico de los olores (Crites & Tchobanoglous, 2000).

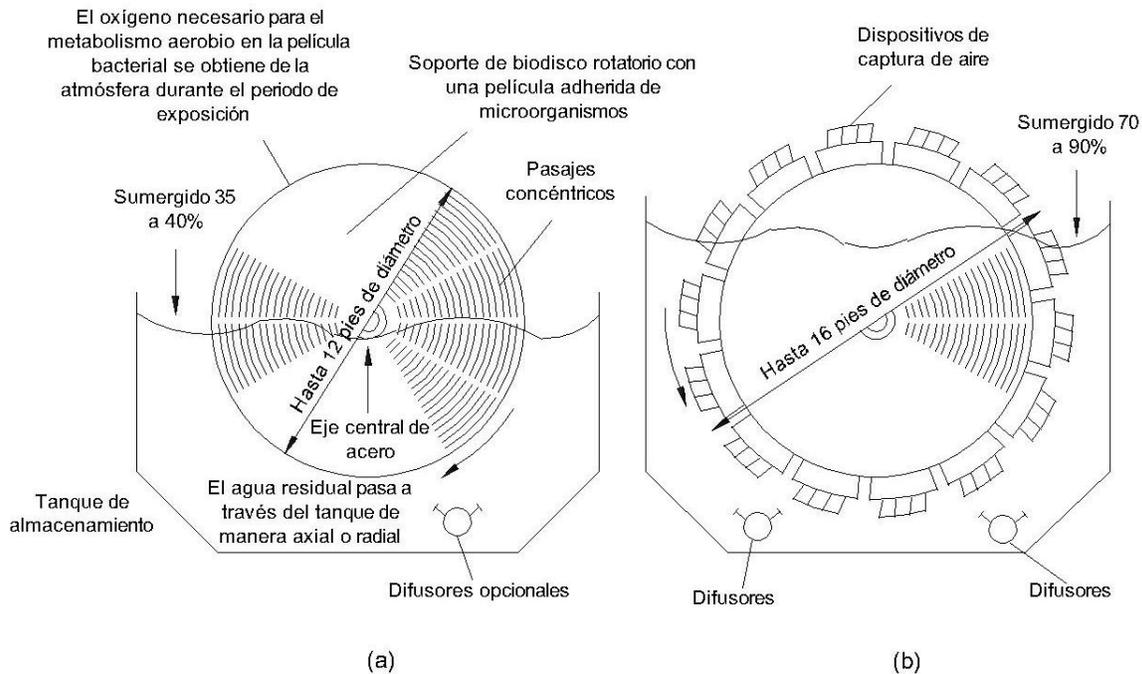


Figura II-15. Esquema de un sistema biológico rotatorio de contacto: (a) tipo convencional con accionamiento mecánico y alimentación opcional de aire y (b) tipo sumergido con aireación suplementaria y dispositivos para capturar el aire para la rotación. Fuente: (Crites & Tchobanoglous, 2000)

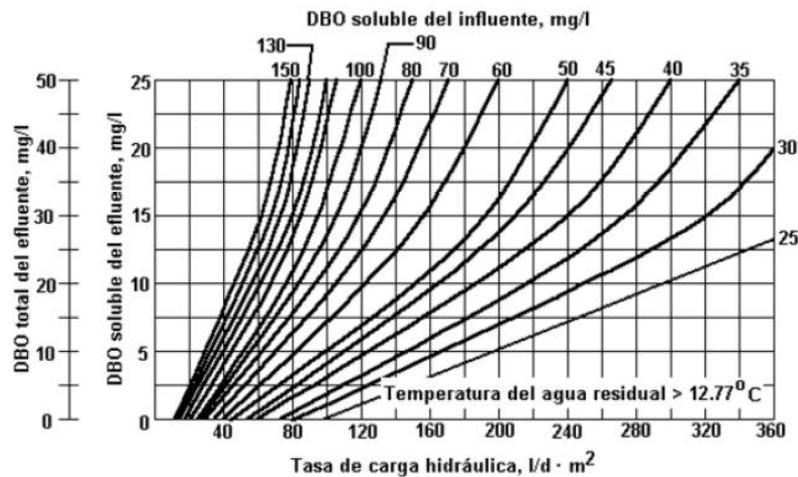
Tabla II-6. Tasas de desnitrificación postanóxica en sistemas CBR sumergidos

Concentración de $\text{NO}^3\text{-N}$ en el efluente, mg/L	Relación de la tasa específica de desnitrificación y el área de empaque, $\text{kg NO}^3\text{-N}/10^3 \text{ m}^2 \cdot \text{d}$
1.0	0.40
6.0	3.25

Adaptado de WEF (1998)

El proceso de diseño se basa normalmente en curvas empíricas de carga suministradas por los fabricantes de los biodiscos (Figura II-16). A partir de estas curvas puede estimarse la carga superficial, $[\text{L/s m}^2]$, para reducir una DBO dada en el influente hasta el valor deseado de la DBO del efluente (Ramalho, 1993). El área superficial requerida para un caudal total de Q_0 es por tanto:

$$A = \frac{Q_0}{L} = \frac{l/d}{l/d \text{ m}^2} = m^2 \quad \text{Ecuación II-3}$$

**Figura II-16. Relaciones de eficiencia y tasa de carga para biodiscos.** Adaptado de Autotrol Corporation, 1978

Sin embargo, se han desarrollado aproximaciones empíricas de diseño para los sistemas de biodiscos con base en los datos de plantas piloto y a escala real considerando como factores fundamentales el área de superficie de los discos y las cargas específicas en términos de g/m^2 de área de disco por día. En este apartado se presentan dos enfoques para el diseño de biodiscos: remoción de DBO y nitrificación (Metcalf & Eddy, 2004).

Remoción de DBO

Los modelos de diseño para la remoción de DBO en biodiscos fueron revisados por la WEF (2000). En una comparación de diseño, los resultados de los modelos generalmente reducen las cargas de

DBO determinadas por el fabricante y son, en algunos casos, similares para la DBO cerca del 90 por ciento. Por esto, se usa el modelo de segundo orden de Opatken (U.S. EPA, 1985) para estimar el área superficial del biodisco requerida, ya que el modelo fue desarrollado con datos de nueve plantas a escala real e incluye etapas de diseño de los reactores. Este modelo de segundo orden se adaptó para el Sistema Internacional de Unidades por Grady (1999), y se adecuaron las variables tomando en cuenta el área superficial del disco. El modelo puede ser utilizado para estimar la concentración de DBO soluble en cada etapa y está en función de la concentración suministrada y el área superficial de contacto.

$$S_n = \frac{-1 + \sqrt{1 + (4)(0.00974)\left(\frac{A_s}{Q}\right)S_{n-1}}}{(2)(0.00974)\left(\frac{A_s}{Q}\right)} \quad \text{Ecuación II-4}$$

donde:

S_n = Concentración de DBO soluble en la etapa n, mg/L

A_s = Área superficial del disco en la etapa n, m²; Q = Gasto, m³/d

Debido a que la ecuación II-4 sólo aplica para DBO soluble, se supone el diseño de un sedimentador secundario del efluente con una proporción DBO soluble/DBO de 0.50 para una DBO en el efluente. De igual manera, sin la DBO soluble para la alimentación del efluente primario del sistema de biodiscos, se considera una proporción de DBO soluble/DBO entre 0.50 y 0.75. Debido a que el diseño está basado en la DBO soluble, la tasa de la carga orgánica soluble en la primera etapa debe ser igual o menor de 12 a 15 g DBOs/m² d, para determinar el área de disco en la primer etapa, además de la DBOs del efluente con la ecuación II-4.

Nitrificación

Los sistemas de tratamiento que cuentan con biodiscos pueden ser utilizados para desarrollar biopelículas para la nitrificación de efluentes secundarios o en bajas cargas de DBOs donde la nitrificación puede ocurrir en sistemas de remoción de DBO. Para una combinación de remoción de DBO y nitrificación, la nitrificación será impedida o inhibida por la adición de DBOs a la unidad CBR. Las bacterias nitrificantes pueden competir por espacio en el disco una vez que la concentración de DBOs es reducida a valores entre 10 y 15 mg/L.

Criterios de la CONAGUA

Con base en investigaciones sobre el funcionamiento de los sistemas de CBR y la recolección de datos de plantas puestas en marcha, la CONAGUA cuenta con algunos criterios y recomendaciones de diseño, los cuales se muestran en la Tabla II-7 (CONAGUA, 2004).

Tabla II-7. Criterios de diseño. Adaptado de CONAGUA, 2004

Parámetro		Valor
Carga Orgánica:		
Sin Nitrificación	[g DBO ₅ / d / m ³ de medio]	480 - 9610
Con Nitrificación	[g DBO ₅ / d / m ³ de medio]	240 - 320
Carga Hidráulica:		
Sin Nitrificación	[L / d / m ² de área superficial]	30.6 - 61.1
Con Nitrificación	[L / d / m ² de área superficial]	12.2 - 24.4
Tiempo de retención (basado en 0.12) gal / pie ²		
Sin Nitrificación [min]		40 - 120
Con Nitrificación [min]		90 - 250
Volumen del Tanque [L / m ² de área de disco]		4.89
Área superficial del medio:		
Disco	[m ² / m ³]	66 - 82
Celosía estándar	[m ² / m ³]	98 - 131
Celosía de alta densidad	[m ² / m ³]	164 - 197

III. METODOLOGÍA

El desarrollo de este proyecto consiste en instalar y operar una planta de tratamiento de aguas residuales evaluando la factibilidad de usar un prototipo de CBR con el fin de cumplir con el objetivo del capítulo I.3. Para esto es importante partir de una metodología de acuerdo a las posibilidades del proyecto (económicas, sociales, tecnológicas, etc.). Dentro de estas posibilidades se encuentra la de utilizar un sistema de CBR adquirido en 1987 y de características descritas en el capítulo III.1. También se aborda la integración de las etapas que constituyen el eje central de actividades y estudios desarrollados. Las etapas identificadas en esta metodología son: planeación, diseño, construcción y operación. Las primeras tres etapas se desarrollan en este capítulo al considerarse parte del proceso de instalación de la planta de tratamiento. La operación se describe en el capítulo IV.

III.1. METODOLOGÍA GENERAL

La estrategia adoptada para el desarrollo de este trabajo se muestra en la Figura III-1 y corresponde a la aplicada a cualquier proyecto de ingeniería, dividida en cuatro etapas fundamentales.



Figura III-1. Etapas generales del proyecto

La planeación es, tal vez, la etapa más importante de un proyecto en la cual se establecen y se examinan en forma crítica los objetivos, y se evalúan los medios para poner en práctica el plan y los resultados del mismo. Además, es esencial que se proporcione una percepción general de los problemas y alternativas.

La etapa de diseño comienza cuando se han definido los objetivos, realizado los análisis correspondientes y se conocen los factores convenientes del proyecto, tales como ubicación, extensión del predio, clima, geotecnia, y otros parámetros que se consideren de importancia, proporcionando la información necesaria para realizar el dimensionamiento y capacidad de equipos e instalaciones a fin de lograr un buen funcionamiento del proyecto. Un mal diseño generará restricciones en las demás etapas que podrán dificultar o imposibilitar el cumplimiento del objetivo establecido.

La etapa de construcción o ejecución debe seguir una programación donde se identifiquen aquellas acciones que afectan severamente el desarrollo de esta etapa (por ejemplo, la excavación, de no realizarse en tiempo es probable el atraso de toda la obra), o bien incrementan costos en relación al tiempo de ejecución de obra. La identificación de estas actividades fundamentales del proyecto se puede obtener con métodos como la ruta crítica. El método de ruta crítica es un proceso administrativo (planeación, organización, dirección y control) de todas y cada una de las actividades componentes de un proyecto que debe desarrollarse durante un tiempo crítico y al costo óptimo.

En la última etapa considerada en este proyecto se debe garantizar la continuidad del funcionamiento de las instalaciones y equipos, así como satisfacer los requerimientos de calidad exigidos por clientes o por las normas correspondientes. Además, se deben tomar acciones para minimizar peligros y riesgos a los trabajadores, medio ambiente y entorno social. También debe existir una supervisión continua de todas las actividades y proporcionar algún tipo de capacitación a los trabajadores directos.

III.2. PLANEACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

La planeación comienza con la recopilación de información desde el origen del problema, definición de objetivos y planteamiento de alcances (capítulo I). Posteriormente se establece el grupo de trabajo y se evalúan y seleccionan alternativas con sus respectivos presupuestos, ejecutando la de mayor factibilidad. Sin embargo, la planeación no termina con la selección de una alternativa, si no que incluye una necesaria iteración entre estas actividades tomando en cuenta los avances obtenidos. La Figura III.3 muestra la secuencia general de las actividades a desarrollar para el cumplimiento de los objetivos de la presente tesis. Se puede observar que se incluyen las etapas de diseño, construcción y operación y mantenimiento al igual que la interacción entre actividades, las cuales se describen a continuación:

Caracterización y aforo. El diseño de cualquier planta de tratamiento demanda, además de estudios topográficos, de mecánica de suelos, etc., la caracterización y gasto de las aguas residuales a tratar a fin de proponer las alternativas para el tratamiento para cumplir con la calidad requerida.

Diseño. En esta fase del proyecto se define el tren de tratamiento del agua residual, al igual que la disposición o manejo de lodos, se especifican las características de todos los procesos y equipos que se emplearán en el proyecto y se elaboran los planos necesarios para su posterior construcción.

Cotización y adquisición. Hace referencia al procedimiento de compra y análisis presupuestal con el objetivo de definir fechas de entrega por parte de fabricantes y fijar, con base en esto, una fecha tentativa de inicio de la construcción.



Figura III-2. Diagrama de planeación de actividades para el proyecto de la planta de tratamiento piloto

Construcción. Consiste en poner en marcha actividades de obra, instalación, montaje, etc., de acuerdo a la fase de diseño y siguiendo una programación de obra que sirva como base para optimizar tiempo y recursos. Culmina con pruebas de funcionamiento generales (hidráulicas, mecánicas, eléctricas, etc.).

Operación y mantenimiento. Consiste en identificar las actividades necesarias que garanticen una buena operación del sistema con programación de fechas de mantenimiento preventivo para los diferentes equipos e instalaciones que comprende el proyecto. En este tema es de suma importancia la elaboración de un manual de operación para los encargados de la planta.

Monitoreo. Esta fase del proyecto hace referencia a la integración de datos de distintos parámetros previamente definidos que sirven como base para conocer el rendimiento del sistema, identificar problemas de operación y garantizar la calidad del efluente según las normas correspondientes.

Reúso del agua tratada. Aunque esta fase del proyecto está contenida en la planeación, se debe aclarar que no forma parte de los objetivos de la tesis el poner en marcha el reúso del agua, pero a mediano plazo se pretende sustituir el agua potable empleada en wc y mingitorios del edificio por agua tratada.

La administración en tiempos de estas actividades se realizó como se presenta en la Tabla III-1.

Tabla III-1. Actividades generales y su programación correspondiente

	2010					2011										2012						
	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar		
Actividad	Recopilación de información																					
						Caracterización y aforo																
	Diseño																					
	Cotización y adquisición																					
	Construcción																					
	Arranque del sistema																					
	Ajustes del sistema																					
	Operación y mantenimiento																					
	Monitoreo																					

Cabe mencionar que el tiempo de ejecución es una proyección esperada donde intervienen factores externos que difícilmente se pueden preveer, sin embargo, el contar con una planeación detallada permite enfocarse en aquellos que sean críticos en el desarrollo del proyecto.

III.2.1. ESTUDIOS PRELIMINARES

En este apartado se hace referencia a los estudios de campo realizados, necesarios para la etapa de diseño. Se presenta en tres subtemas: (a) Caracterización del agua residual, (b) Aforo del agua residual y, (c) Factibilidad del sistema propuesto.

Se generó el programa de actividades mostrado en la Tabla III-2 con el fin de contar con los principales parámetros de diseño de cualquier planta de tratamiento de agua residual.

Tabla III-2. Programación de actividades para el aforo y caracterización del agua residual

Parámetro	Días (Noviembre 2010)								
	8	9	10	11	12	13	16	17	18
Muestreo del agua residual	X	X	X	X	X				
pH	X	X	X	X	X				
Temperatura	X	X	X	X	X				
Demanda Química de Oxígeno		X	X	X	X	X			
Demanda Bioquímica de Oxígeno*		X ₀	2X ₇ /X ₅	X ₅	X ₅				
Sólidos Totales		X	X	X	X	X			
Sólidos Suspendidos Totales		X	X	X	X	X			
Sólidos Disueltos Totales		X	X	X	X	X			
Sólidos Sedimentables		X	X	X	X	X			
Gasto generado	X	X	X	X	X				

* X_i, i = día de realización de prueba (i = 0 lectura inicial, i = 5 o 7 lectura final al quinto o séptimo día)
 Los detalles de estas determinaciones se encuentran en el Anexo II, y se presenta un resumen de éstos a continuación.

Características del agua residual

Se tomaron muestras simples cada hora simultáneamente con el aforo de la descarga de aguas residuales, con el fin de obtener, al final del día, la muestra compuesta y conservarla en refrigeración para su análisis a la mañana siguiente.

La caracterización del agua residual del edificio de la DICyG se llevó a cabo entre los días 8 y 12 de noviembre del 2010, de las 7 am a las 8 pm (horario de oficinas) con el objetivo de determinar DBO, ST, SST, SDT, pH y temperatura, listados en la Tabla III-3.

Tabla III-3. Caracterización del agua residual de la DICyG

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio de 5 días
pH	6.56	7.23	6.84
Temperatura [°C]	14	18	16
Demanda Química de Oxígeno (DQO) [mg/L]	626	721	675
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) [mg/L]	180	368	284
Sólidos Totales (ST) [mg/L]	760	1,124	896
Sólidos Suspendidos Totales (SST) [mg/L]	180	330	272
Sólidos Disueltos Totales (SDT) [mg/L]	551	795	624
Sólidos Sedimentables (SSe) [ml/L]	8	11	9

Los resultados registrados hacen referencia a un agua residual de concentración media-alta de acuerdo a los valores de la Tabla III-4. El procedimiento detallado de muestreo, conservación y caracterización se incluye como Anexo II. La temperatura del agua es un parámetro importante debido a sus efectos en reacciones químicas y tasas de reacción, la vida acuática y sus distintos usos generales. Un incremento en la temperatura puede afectar seriamente la solubilidad del oxígeno en el agua, ya que a menor temperatura mayor solubilidad. En el caso de la actividad biológica dentro del tratamiento de las aguas residuales las temperaturas óptimas se encuentran entre 25 y 35°C (Metcalf & Eddy, 2004). La tasa de crecimiento de las bacterias nitrificantes es afectado por la temperatura en un intervalo de 8 a 30 °C (Bitton, 2011).

Tabla III-4. Composición típica de agua residual doméstica cruda

Parámetro	Unidad	Concentración		
		Baja	Media	Alta
Sólidos totales (ST)	mg/L	390	720	1230
Disueltos totales (SDT)	mg/L	270	500	860
Fijos	mg/L	160	300	520
Volátiles	mg/L	110	200	340
Suspendidos totales (SST)	mg/L	120	210	400
Fijos	mg/L	25	50	85
Volátiles	mg/L	95	160	315
Sólidos sedimentables	ml/L	5	10	20
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅ , 20°C)	mg/L	110	190	350
Carbón orgánico total (COT)	mg/L	80	140	260
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	250	430	800
Nitrógeno total (N)	mg/L	20	40	70
Fósforo total (P)	mg/L	4	7	12
Grasas y aceites	mg/L	50	90	100

Adaptado de Metcalf & Eddy, 2004

En cuanto al pH, el intervalo de concentración adecuado para la vida en un proceso aerobio es estrecho y crítico ($6.0 < \text{pH} < 9.0$). Un agua residual con grandes concentraciones de ion hidrógeno es difícil de tratar por medios biológicos, y si la concentración no es alterada antes de la descarga puede alterar la concentración del agua natural del cuerpo receptor (Metcalf & Eddy, 2004). Para efluentes tratados la NOM 001 SEMARNAT exige valores entre 5 y 10 unidades. De acuerdo a lo anterior, el pH en el sistema de CBR debe encontrarse en el intervalo de 6 a 9 unidades y en el efluente entre 5 y 10 unidades.

Aforo del agua residual

Se efectuó, de manera conjunta al muestreo para la caracterización, la cuantificación del gasto de agua residual generada por el edificio. El comportamiento intermitente de las descargas y la ausencia de medidor del suministro de agua potable impidieron un análisis certero, ya que la manera de obtener el gasto por día fue manual con base en el volumen colectado en la descarga al interior de la grieta. El procedimiento se encuentra detallado en el Anexo I.

Como resultado se obtuvo un gasto diario de descarga aproximado de $1.3 \text{ m}^3/\text{día}$. Tomando en cuenta población flotante y sentando las bases de diseño para condiciones críticas, se consideró un factor de seguridad de 1.3 (aumento del gasto en un 30%) dando como resultado final un gasto máximo de $1.7 \text{ m}^3/\text{día}$.

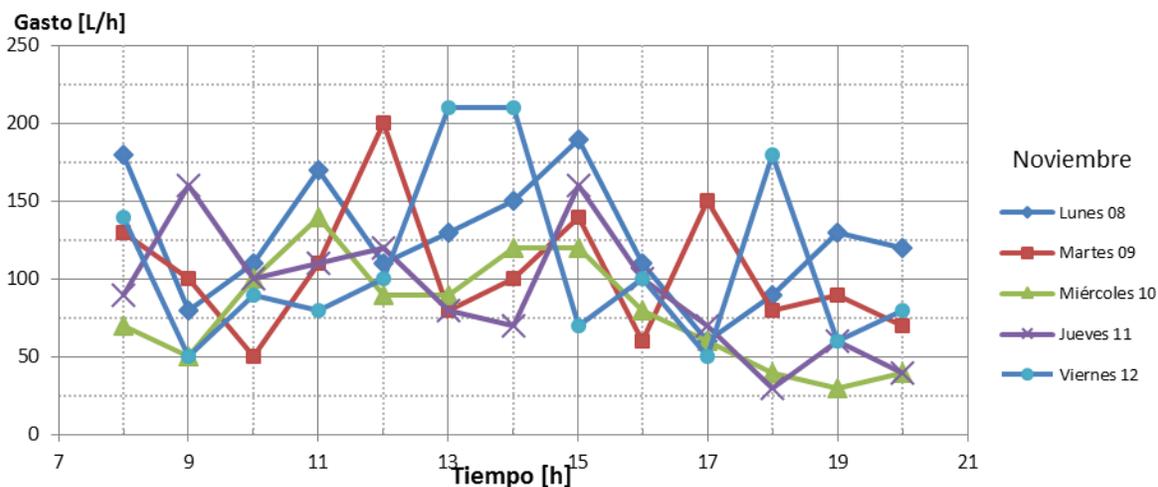


Figura III-3. Hidrogramas de descarga del agua residual de la DICyG

La Figura III-3 muestra el comportamiento de los hidrogramas de descarga obtenidos durante el estudio y se observa que aunque existe gran variación durante los días de la semana, los gastos máximos se presentan entre las 12:00 y las 15:00 horas, con un gasto punta entre 13:00 y 14:00

horas. En la Figura III-4 se puede observar que se tiene mayor generación de agua residual los días lunes y viernes al comparar las curvas masa (volumen acumulado) correspondientes a cada día de medición.

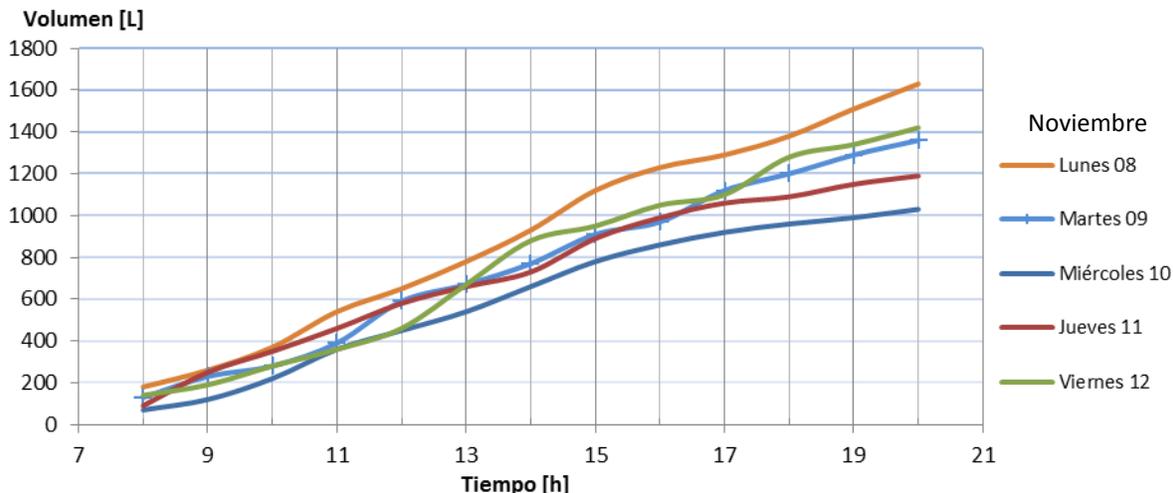


Figura III-4. Curvas de volúmenes acumulados de agua residual generada por la DICyG

III.3. DISEÑO DE LAS UNIDADES DE LA PLANTA PILOTO

Una vez recopilados los datos básicos del proyecto se realizó el diseño de las unidades de la planta. En esta etapa se evalúa la posibilidad del uso de un CBR como proceso biológico en la planta de tratamiento propuesta. Dicha unidad fue objeto de investigaciones anteriores (Solorio, 1988) y se encuentra almacenada en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería. También se presentan el diagrama de balance de masa y los planos correspondientes. Posteriormente se usaron los datos obtenidos en los estudios preliminares para determinar la capacidad y selección de cada una de las unidades y equipos que participan en el tratamiento con el fin de cumplir con los valores de descarga establecidos por la NOM-003-SEMARNAT.

III.3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO CBR

El sistema CBR fue adquirido en 1987 con el objetivo de investigar el tratamiento de agua de remojo de la cebada en la industria maltera. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios al presentar una remoción de materia orgánica como DBO soluble mayor al 95% y DQO soluble mayor al 80% (Solorio, 1988). Desde entonces el equipo se ha conservado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería sin contar, hasta ahora, con un proyecto que

involucre su uso. Este prototipo consiste en un tanque cilíndrico con un eje central de acero (flecha) que soporta un medio plástico corrugado (Autotrol Corporation, 1978). El eje tiene una rotación lenta y los medios plásticos se sumergen en un 35% aproximadamente dentro del nivel del agua residual. La flecha está soportada sobre los bordes del tanque por medio de rodamientos y está dividida en tres etapas. Además, está provisto de una cámara de alimentación donde se vierte el agua residual y por medio de canjilones ubicados sobre los brazos sujetos al eje de rotación inicia el proceso biológico. El prototipo se muestra en la figura II-17.

Características principales del equipo BioSurf, Autotrol:

Etapas: 3 con arreglo 2 – 1 – 1

Área superficial: 23 m²

Relación volumen del tanque / área superficial: 0.005 m³/m² (nominal) con biomasa

Diámetro del disco: 0.5 metros

Número de discos: 18 la primera etapa y 9 cada una de las dos siguientes

Longitud de cada etapa: 66 cm 1ª etapa y 33 cm cada una de las dos siguientes

Características mecánicas:

Motor: Westinghouse

Engranaje motriz: 60 dientes

Voltaje: 115 Volts

Cadena: RC 35

Potencia: 0.25 HP

Revoluciones de la flecha: 7 rpm

Fases: 1

Velocidad periférica media: 0.86 m/s

Frecuencia: 60 ciclos

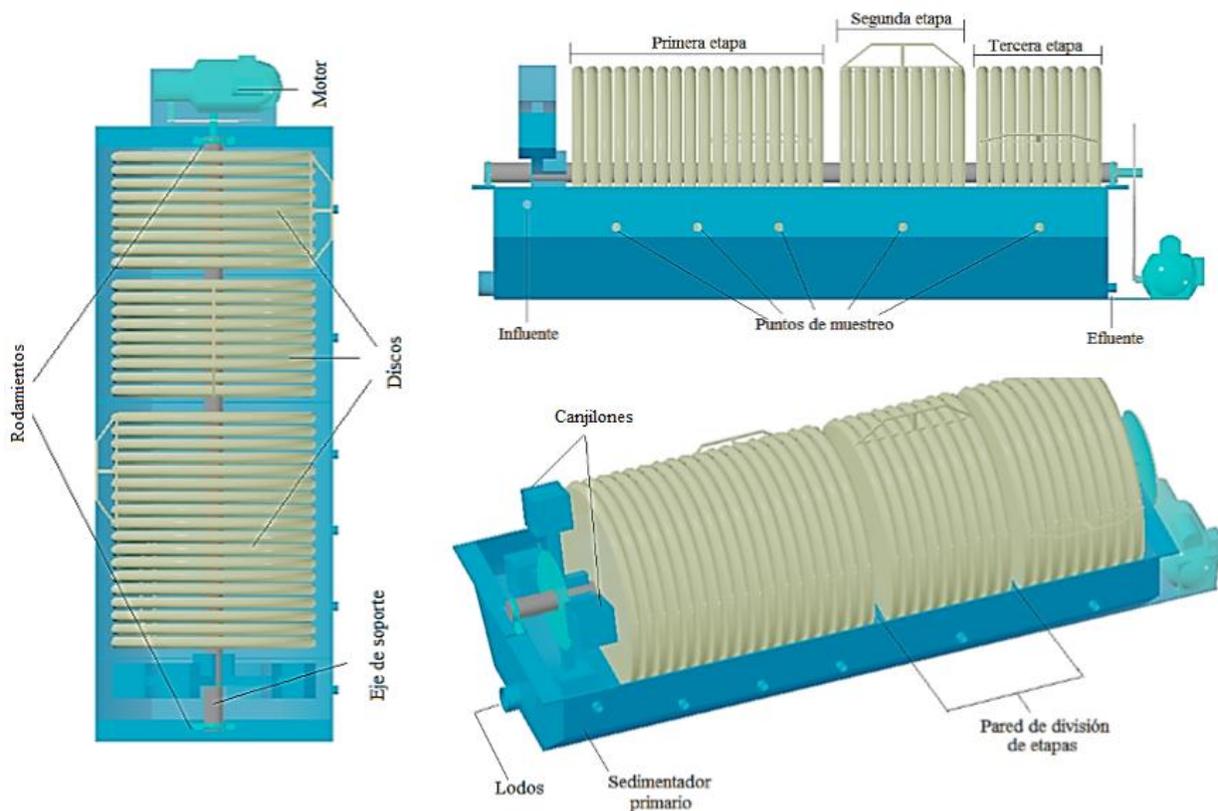


Figura III-5. Vistas y componentes del CBR prototipo

Evaluación de factibilidad del sistema de tratamiento propuesto

No se dispone de las curvas de operación de la unidad de CBR con la que se cuenta para este proyecto, mencionadas en el capítulo II.3.4 (Figura II-16), por lo que se realizó un análisis de los parámetros según los criterios de diseño de la bibliografía: carga orgánica, carga hidráulica y tiempo de retención hidráulico (Tabla II-5 y Tabla II-7).

Con base en los datos registrados en la Tabla III-3 y conociendo el gasto de diseño y el área superficial se verifica la carga orgánica que se puede proporcionar al sistema y se compara con los emitidos por la bibliografía, el procedimiento es el siguiente:

Datos:

$$Q = 1.7 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$S_0 = 284 \text{ gDBO}/\text{d}\cdot\text{m}^3$$

$$A_{\text{sup}} = 23 \text{ m}^2$$

Carga orgánica:

$$CO = \frac{Q * S_0}{A} \quad CO = \frac{1.72 \left[\frac{m^3}{d} \right] * 284 \left[\frac{gDBO}{d m^3} \right]}{23 [m^2]} = 21.23 \left[\frac{gDBO}{d m^2} \right]$$

Se compara con los criterios de la Tabla II-5:

DBO₅ recomendada: **8 [gDBO/d m²] a 20 [gDBO/d m²]** (sin nitrificación)

DBO₅ recomendada: **5 [gDBO/d m²] a 16 [gDBO/d m²]** (con nitrificación)

Como se puede observar, la carga orgánica proporcionada al biodisco es mayor que los criterios de diseño. Para reducir el valor de este parámetro se puede variar el sustrato en el influente, es decir, usar un primer tratamiento del agua residual que disminuya la DBO y no permita rebasar la capacidad del sistema CBR. No es necesario un análisis de los demás parámetros tomando en cuenta que el criterio principal para este sistema es el de carga orgánica.

Para resolver este problema se analizó el uso de un biodigestor anaerobio con capacidad de retención de sólidos suspendidos totales de hasta 74%, así como una remoción en DBO del 45% (Colegio de Ingenieros Ambientales de México A.C., 2007) y diseñado para edificios de oficinas de 50 personas según el fabricante. Además, ofrece la ventaja de extraer los lodos sin requerimiento de energía al utilizar los principios de funcionamiento de un sifón.

Para realizar nuevamente los cálculos de factibilidad del CBR se tomó en cuenta la instalación de este biodigestor anaerobio, generándose un nuevo valor de DBO en la entrada al biodisco; tomando en consideración que este proceso remueve el 35% de DBO (valor conservador al ser menor que el reportado en la bibliografía de 45%). Así, el nuevo cálculo de carga orgánica es el siguiente:

$$CO = \frac{1.72 \left[\frac{m^3}{d} \right] * 185 \left[\frac{gDBO}{d m^3} \right]}{23 [m^2]} = 13.8 \left[\frac{gDBO}{d m^2} \right]$$

DBO₅ recomendada: **8 [gDBO/d m²] a 20 [gDBO/d m²]** (sin nitrificación)

DBO₅ recomendada: **5 [gDBO/d m²] a 16 [gDBO/d m²]** (con nitrificación)

Como se puede observar el valor se encuentra dentro de los intervalos de la Tabla II-5; sin embargo, es necesario analizar los demás parámetros para determinar su capacidad de tratamiento. No se

dispone del dato de la densidad del medio de soporte, por lo que no se puede hacer la comparación con la Tabla II-7.

Carga hidráulica:

Se utiliza la ecuación II-1 y se tiene lo siguiente:

$$CH = \frac{Q}{A} = \frac{1720 \left[\frac{L}{d} \right]}{23 [m^2]} = 74.8 \left[\frac{L}{m^2} \right]$$

Carga hidráulica recomendada:

0.08 [m³/m² d] a 0.16 [m³/m² d] (Tabla II-5)

30.6 [L/d/m²] a 61.1 [L/d/m²] (Tabla II-7)

Como se puede observar, el valor de proyecto se encuentra dentro del rango de valores de la Tabla II-5 (Metcalf & Eddy), mientras que ocurre lo contrario con la Tabla II-7 (CONAGUA). Esta diferencia de valores puede deberse a los datos registrados en los estudios realizados por los autores.

Tiempo de retención:

De las pocas características con las que se cuenta del biodisco, se tiene el valor de la relación volumen/superficie, dato que se emplea para calcular el tiempo de retención de la siguiente manera:

$$\theta = \frac{\text{Volumen}}{\text{Gasto}} = \frac{V}{Q}$$

Si se tiene que:

$$\frac{V}{A} = 0.005 \left[\frac{m^3}{m^2} \right]; \quad \text{con } A = 23 [m^2]$$

$$V = 0.005 \left[\frac{m^3}{m^2} \right] * 23 [m^2] = 0.115 [m^3]$$

Sustituyendo valores en la ecuación anterior resulta:

$$\theta = \frac{0.115 [m^3]}{1.7 \left[\frac{m^3}{d} \right]} = 0.067 [d] \left(\frac{24 [h]}{[d]} \right) = 1.62 [h]$$

Sin nitrificación $0.7 < \theta < 1.5$ [h] (Tabla II-5)

Con nitrificación $1.5 < \theta < 4$ [h] (Tabla II-5)

El intervalo recomendado por la Tabla II-5 es de 0.7 a 1.5 [h], aunque el valor es un poco mayor este rango se considera favorable.

La CONAGUA basa este concepto en $0.12[\text{gal}/\text{pie}^2]$, por lo que se sigue el siguiente procedimiento:

$$0.12 \left[\frac{\text{gal}}{\text{pie}^2} \right] * \frac{3.785[\text{L}]}{1[\text{gal}]} * \left(\frac{1[\text{pie}]}{0.3048[\text{m}]} \right)^2 = 4.89 \left[\frac{\text{L}}{\text{m}^2} \right]$$

Para este valor se recomienda entre 0.67 [h] y 2 [h], por lo que expresado en otras unidades es:

$$\frac{4.89 \left[\frac{\text{L}}{\text{m}^2} \right]}{0.67[\text{h}]} = 7.30 \left[\frac{\text{L}}{\text{m}^2 \text{h}} \right]; \quad \frac{4.89 \left[\frac{\text{L}}{\text{m}^2} \right]}{2[\text{h}]} = 2.44 \left[\frac{\text{L}}{\text{m}^2 \text{h}} \right] \quad (\text{sin nitrificación})$$

$$\frac{4.89 \left[\frac{\text{L}}{\text{m}^2} \right]}{1.5[\text{h}]} = 3.26 \left[\frac{\text{L}}{\text{m}^2 \text{h}} \right]; \quad \frac{4.89 \left[\frac{\text{L}}{\text{m}^2} \right]}{4.17[\text{h}]} = 1.17 \left[\frac{\text{L}}{\text{m}^2 \text{h}} \right] \quad (\text{con nitrificación})$$

Para poder comparar con este dato es necesario determinar el gasto en litros por hora:

$$T_r = \frac{Q \left[\frac{\text{L}}{\text{d}} \right]}{24 \left[\frac{\text{h}}{\text{d}} \right]} = \frac{1720 \left[\frac{\text{L}}{\text{d}} \right]}{24 \left[\frac{\text{h}}{\text{d}} \right]} = 72 \left[\frac{\text{L}}{\text{h}} \right]$$

Conocida el área superficial del biodisco, se tiene:

$$\frac{72 \left[\frac{\text{L}}{\text{h}} \right]}{23[\text{m}^2]} = 3.13 \left[\frac{\text{L}}{\text{m}^2 \text{h}} \right]$$

El resultado se encuentra dentro de los valores establecidos por la Tabla II-7 y en el valor límite para un proceso con nitrificación, es decir, $1.17 < 3.13 < 3.26$ [L/m²h].

El resumen de los datos calculados se encuentra en la Tabla III-5 donde se puede observar que empleando un biodigestor anaerobio la capacidad de la unidad CBR es apta para este proyecto. En

la etapa de diseño se muestra un diagrama general de balance de masa, donde se determina, con base en cálculos, la calidad esperada del efluente.

Tabla III-5. Comparación de parámetros de diseño

Parámetro	Proyecto		Criterio	
	Sin tratamiento primario	Con tratamiento primario	Metcalf	CONAGUA
Carga orgánica [gDBO/d m ²]	21.2	13.8	8 < CO < 20 (SN) 5 < CO < 16 (CN)	-
Carga hidráulica [m ³ /m ² d]	0.075		0.08 < CH < 0.16 (SN) 0.03 < CH < 0.08 (CN)	-
[L/m ² d]	74.8		-	30.6 < CH < 61.1 (SN) 12.2 < CH < 24.4 (CN)
Tempo de retención hidráulica [h]	1.62		0.7 < θ < 1.5 (SN) 1.5 < θ < 4 (CN)	-
[L/m ² h]	3.08		-	2.44 < θ < 7.3 (SN) 1.17 < θ < 3.26 (CN)

SN = Sin nitrificación

CN = Con nitrificación

En la Tabla III-5 se muestran los parámetros más importantes para el diseño de plantas con base en biodiscos, así como sus valores recomendados. Además, la alternativa de incluir en el tren un tratamiento primario solo afecta los valores de carga orgánica, lo que permite justificar el uso del biodigestor como unidad de tratamiento primario.

Diagrama de flujo y descripción de la planta piloto

La División de Ingenierías Civil y Geomática cuenta con un área jardinada en la cual se construyó la planta de tratamiento. El diagrama de flujo del sistema de tratamiento de aguas residuales propuesto se muestra en la Figura III-6. Se capta el agua residual a partir del último registro de la instalación de evacuación del edificio, con una derivación que conduce el agua hacia un cárcamo de bombeo, desde donde se eleva hasta un tanque de igualación ubicado a la altura necesaria para llevar a cabo el tratamiento por gravedad. Posteriormente, el agua pasa a un biodigestor, con el objetivo de reducir sólidos sedimentables, principalmente; se tiene a continuación el reactor de contactores biológicos rotatorios, con las características antes señaladas, para pasar a un tanque de

sedimentación secundaria, y finalmente, se cuenta con un tanque de almacenamiento del agua tratada para su posterior reúso, y en este se lleva a cabo la desinfección del efluente tratado.

Para evitar el efecto de dilución o cambio de pH por lluvia, efectos de partículas suspendidas arrastradas por vientos, controlar los efectos del sol en la biopelícula como la resequead y tener un control de olores y monitoreo del sistema, se dispone de una caseta que alberga el biodisco y tanque de sedimentación secundaria, proporcionando un espacio semi-cerrado en el que se debe cuidar no restringir la entrada de aire para disponer de suficiente oxígeno; además, con esto se intenta mitigar los impactos visuales negativos de la obra.

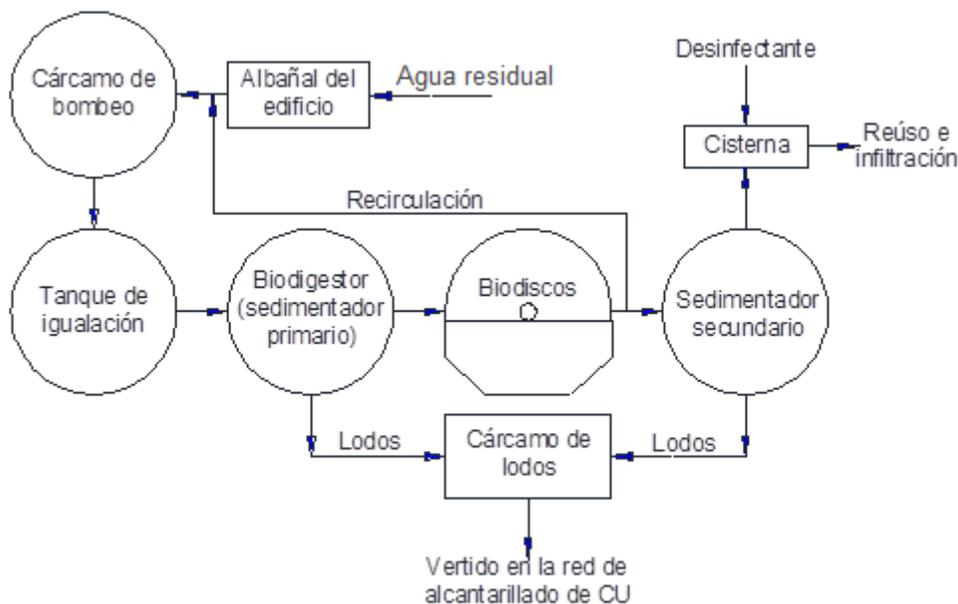


Figura III-6. Diagrama de flujo del sistema propuesto

Es pertinente aclarar que cuenta con canales o tuberías de desvío o recirculación en las unidades que puedan presentar desbordes por una mala operación o la falla de un equipo, siendo esencial contar con ello en la obra de toma en el sistema de biodiscos. La recirculación de la Figura III-6 se utiliza durante la estabilización del sistema, en específico la unidad CBR, y durante la operación en fines de semana.

Otro punto importante en cualquier planta de tratamiento es el relativo al manejo y disposición de lodos, donde existe una gran variedad de tratamientos para neutralizar los contaminantes y agentes patógenos inherentes a estos residuos. Sin embargo, se requiere de un análisis detallado de sus características en la planta, al igual que de la cantidad que se produce, lo que hace que este punto no

esté considerado en los objetivos de la tesis de este proyecto. En esta etapa, lodos se trasladarán a un pozo de visita de la red de alcantarillado de Ciudad Universitaria, con el fin de hacerlos llegar a la planta de tratamiento de la UNAM ubicada en la avenida Cerro del Agua.

En la Figura III-7 se muestra el arreglo general de la planta piloto, así como la adecuación del proyecto respecto al espacio disponible, siguiendo la descripción del proceso anteriormente mencionada. En la Figura III-8 se ilustra el perfil hidráulico del proyecto indicando la posición de las bombas y los tramos que funcionan con flujo a gravedad. También se puede notar que la carga estática de bombeo es de aproximadamente 4 metros, y estimando en 15% de esta elevación las pérdidas debidas a la fricción y secundarias, entrando en la curva característica de la bomba (con 4 m de carga) daría un gasto Q de 100 litros por minuto. Estas curvas se pueden consultar en el Anexo IV de este trabajo.

Balance de masa

El concepto de balance de masa o balance de materia es necesario en procesos empleados en las plantas de tratamiento de agua. En este caso se realizó un balance de masa por componente tomando en cuenta las consideraciones de diseño escritas en este capítulo. Se desprecian los fenómenos llevados a cabo antes de la entrada al sedimentador primario ya que la función de dichas unidades anteriores es mayormente hidráulica. El procedimiento de cálculo es el siguiente:

Biodigestor (sedimentador primario). Las características de esta unidad se describieron anteriormente, las consideraciones hechas para este proyecto fueron: (1) remoción de 35% de DBO y (2) remoción del 65% de SST, ambas obtenidas de la bibliografía (Colegio de Ingenieros Ambientales de México A.C., 2007).

Datos de entrada:

$$Q = 1,720 \text{ L/d}$$

$$DBO_{\text{Total}} = 284 \text{ mg/L}$$

$$SST = 272 \text{ mg/L}$$

Consideraciones:

$$\text{Remoción de DBO} = 35\%$$

$$\text{Remoción de SST} = 65\%$$

Salida del biodigestor y entrada al biodisco:

$$Q = \text{Gasto} - \text{Gasto de lodos}$$

$$Q = 1,720 - 15 = 1,705 \text{ L/d}$$

$$DBO = DBO_{\text{influyente}} - DBO_{\text{removida}}$$

$$DBO = 284 - (284 * (1 - 0.35)) = 186 \text{ mg/L}$$

$$SST = SST_{\text{influyente}} - SST_{\text{removidos}}$$

$$SST = 272 - (272 * (1 - 0.65)) = 96 \text{ mg/L}$$

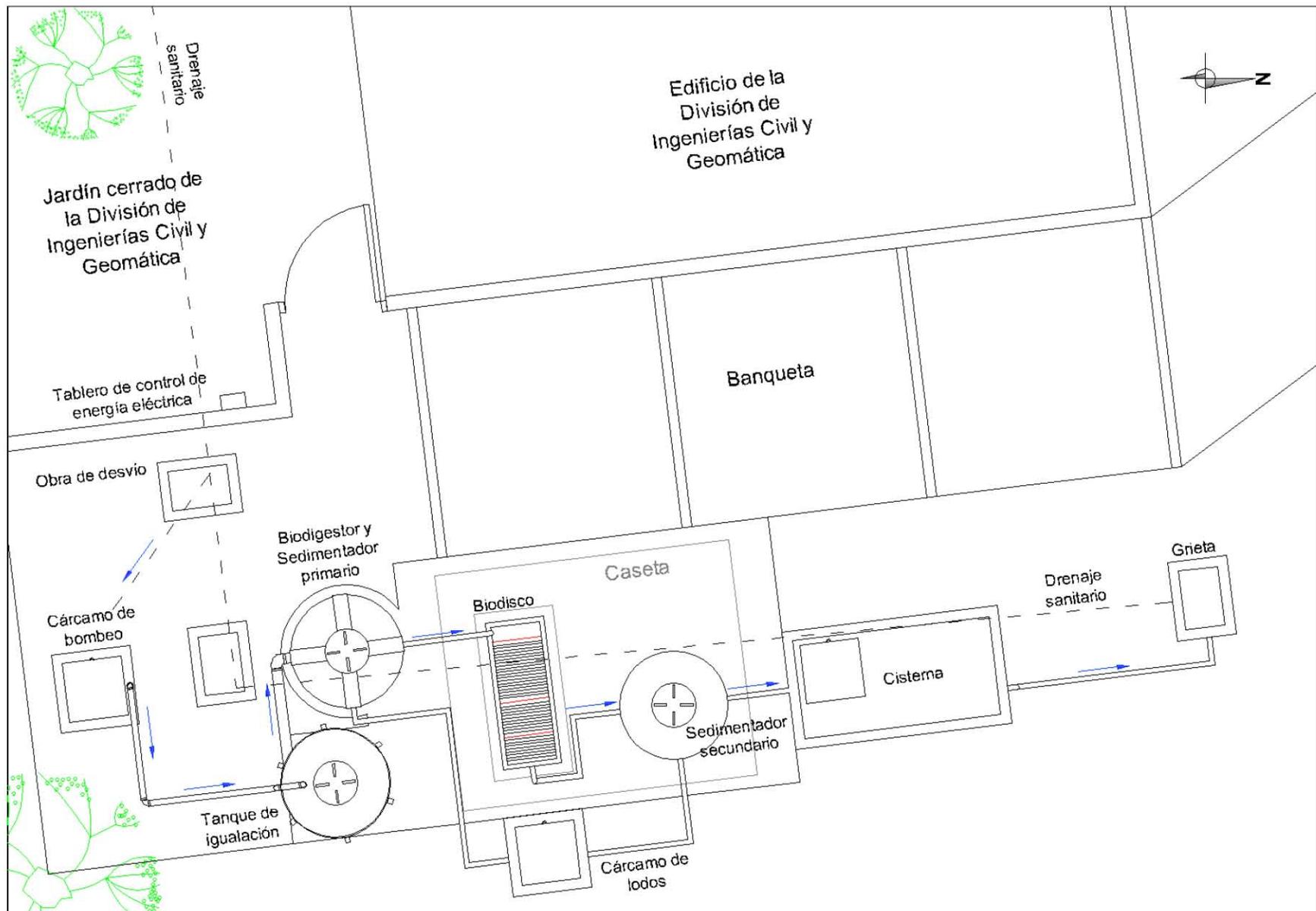


Figura III-7. Vista en planta de las unidades de la planta piloto. Distribución propuesta originalmente

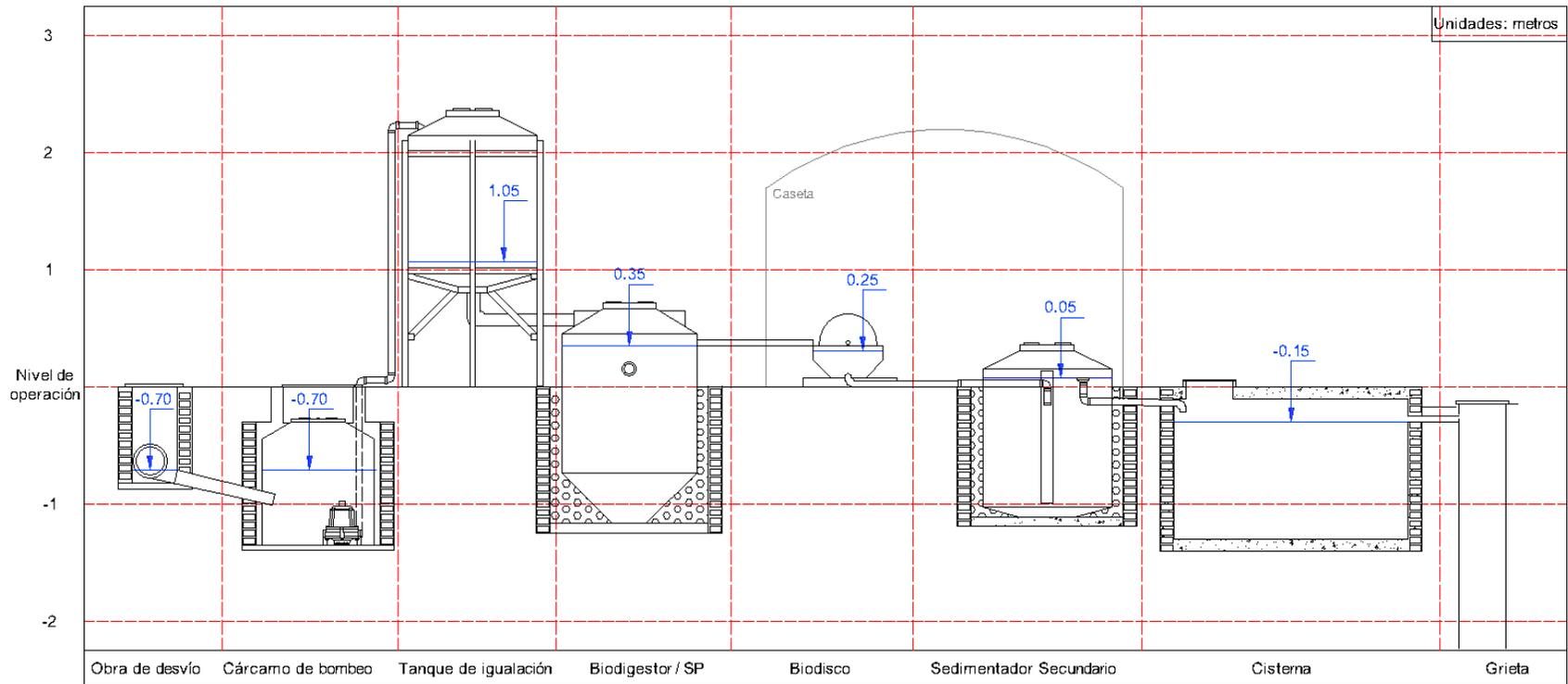


Figura III-8. Perfil hidráulico de la planta piloto

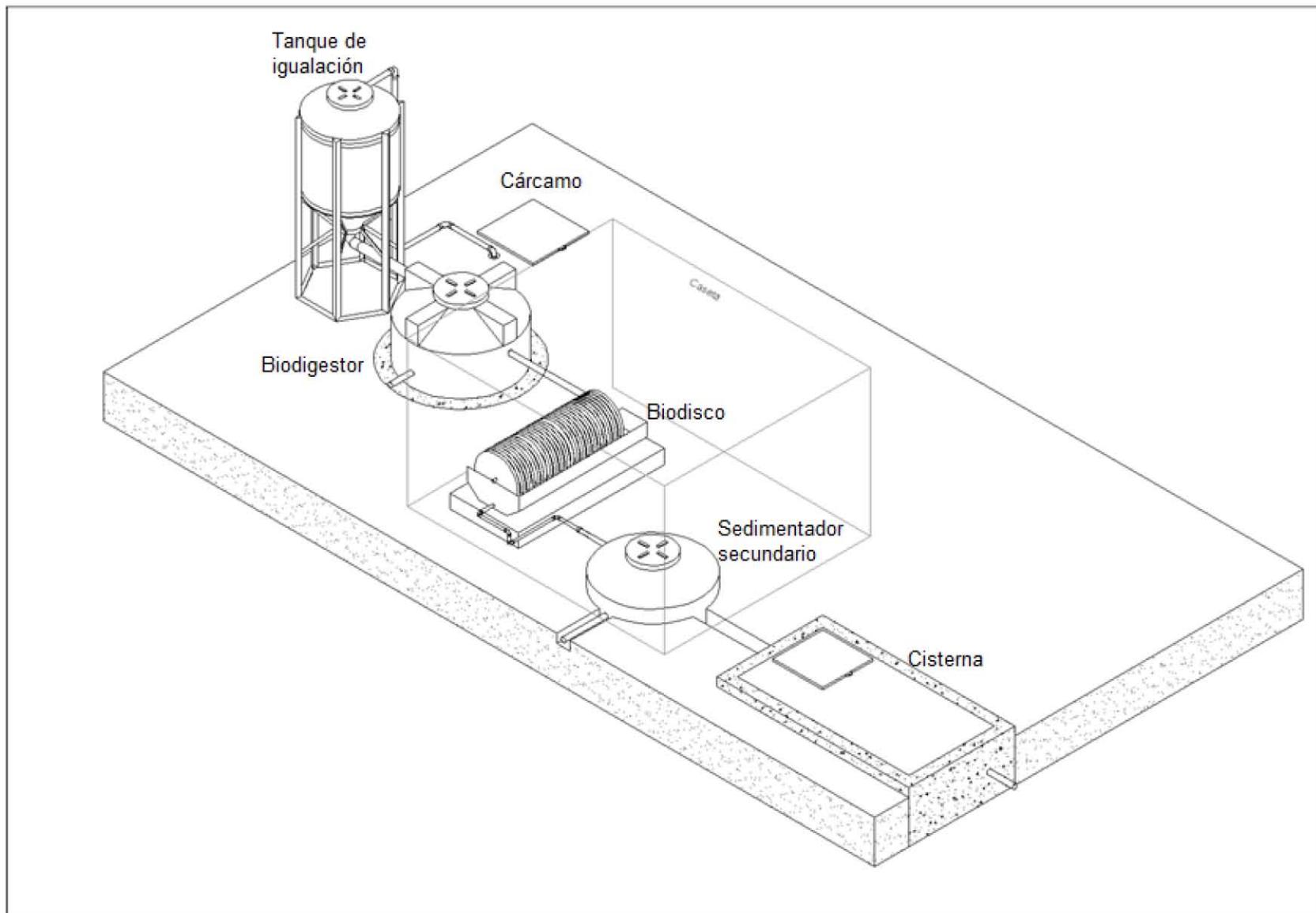


Figura III-9. Isométrico del tren de tratamiento de agua

Biodisco. Las unidades de CBR remueven, en su mayoría, sustrato soluble medido en DBO y, al ser un sistema de biopelícula fija sólo mejora la capacidad de sedimentación de sólidos suspendidos, mas no los remueve. Para revisar la capacidad de remoción de la unidad CBR para el proyecto se utilizó el modelo de Opatken mencionado en el Capítulo II. Sin datos de la DBO soluble en la alimentación al sistema CBR se puede asumir una tasa de relación entre 0.5 y 0.75 de DBO soluble / DBO total (Metcalf & Eddy, 2004). En este caso se asume una tasa de DBO soluble / DBO total de 0.5. Los cálculos se realizaron de la siguiente manera:

Datos:

$$\text{Área total} = 23 \text{ m}^2$$

Etapla 1

$$A_1 = 11.5 \text{ m}^2$$

$$S_0 = (\text{DBO Soluble}/\text{DBO Total}) * \text{DBO Total}$$

$$S_0 = (0.5) * 186 = 93 \text{ mg/L}$$

$$S_n = \frac{-1 + \sqrt{1 + (4)(0.00974) \left(\frac{A_s}{Q}\right) S_{n-1}}}{(2)(0.00974) \left(\frac{A_s}{Q}\right)} \quad (\text{Ecuación II.4})$$

$$S_1 = \frac{-1 + \sqrt{1 + (4)(0.00974) \left(\frac{11.5}{1.705}\right) 93}}{(2)(0.00974) \left(\frac{11.5}{1.705}\right)} = 30.8 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Etapla 2

$$A_2 = 5.75 \text{ m}^2$$

$$S_2 = \frac{-1 + \sqrt{1 + (4)(0.00974) \left(\frac{5.75}{1.705}\right) 30.8}}{(2)(0.00974) \left(\frac{5.75}{1.705}\right)} = 19 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Etapla 3

$$A_2 = 5.75 \text{ m}^2$$

$$S_3 = \frac{-1 + \sqrt{1 + (4)(0.00974) \left(\frac{5.75}{1.705}\right) 19}}{(2)(0.00974) \left(\frac{5.75}{1.705}\right)} = 13.2 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Dado que la ecuación II.4 utiliza la $DBO_{soluble}$ como parámetro se obtiene la DBO_{Total} con la relación $DBO_{soluble}/DBO_{Total} = 0.5$ obtenida anteriormente:

$$DBO_{Total} = 2S_3 = 2 \cdot (13.2) = 26.4 \text{ mg/L}$$

Salida del biodisco y entrada del sedimentador secundario:

$$Q = 1,705 \text{ L/d}$$

$$DBO_{Total} = 26.4 \text{ mg/L}$$

$$SST = 96 \text{ mg/L}$$

Sedimentador secundario. El diseño se hizo con base en la configuración del biodigestor y considerando la facilidad de sedimentación de lodos provenientes de un sistema de cultivo adherido. El diseño de sedimentadores secundarios para sistemas de cultivo adherido es similar al de los clarificadores primarios debido a que las características de sedimentación de la biopelícula desprendida son semejantes a las de las partículas discretas. Los lodos deben retirarse del tanque de sedimentación antes de que se desarrollen en él condiciones anaerobias. Si los lodos comenzaran a descomponerse, se producirían burbujas de gas que se adherirían a las partículas de sólidos que, en vez de sedimentarse, se elevarían hasta la superficie (Valdez & Vázquez, 2003).

Datos de diseño:

$$Q = 1,72 \text{ m}^3/\text{d}$$

Carga superficial recomendada: $30 \text{ a } 50 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ (Metcalf & Eddy, 2004)

Se calcula el área superficial del tanque de la siguiente manera:

$$A = \frac{Q}{CS} = \frac{1.72 \text{ m}^3/\text{d}}{30 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}} = 0.057 \text{ m}^2$$

Para sedimentadores circulares se determina el diámetro requerido:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.057 \text{ m}^2}{\pi}} = 0.27 \text{ m}$$

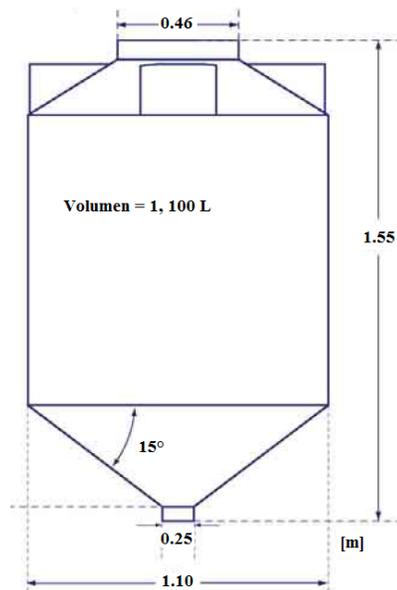
La profundidad se calcula considerando un tiempo de retención recomendado de 2 horas (Metcalf & Eddy, 2004):

$$V = Q \cdot \theta = 1.72 \frac{m^3}{d} \cdot \left(\frac{1 d}{24 h} \right) \cdot 2h = 0.143 m^3$$

Por lo tanto, la profundidad (h) es:

$$h = \frac{V}{A} = \frac{0.143 m^3}{0.057 m^2} = 2.51 m$$

Sin embargo, se utilizó un tanque de polietileno cónico (tolva) de mayores dimensiones, siendo éste el más cercano según el fabricante. Las características finales del tanque son las siguientes:



Área superficial:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (1.1 m)^2}{4} = 0.95 m^2$$

Carga superficial:

$$CS = \frac{Q}{A} = \frac{1.72 m^3/d}{0.95 m^2} = 1.81 m^3/m^2 \cdot d$$

Tiempo de retención, el volumen útil es el calculado a partir de una profundidad (h) real de 1.2 m:

$$\theta = \frac{V_{\text{útil}}}{Q} = \frac{1.06 m^3}{1.72 m^3/d \left(\frac{1 d}{24 h} \right)} = 14.8 h$$

Figura III-10. Dimensiones del sedimentador secundario (Rotoplas®)

Datos de salida:

Q = Gasto – Purga de lodos

Q = 1,720 – 10 = 1,695 L/d

DBO_T ≤ 27 mg/L

SST ≤ 30 mg/L

Lodos. La extracción de lodos integra la salida del sistema de las cantidades removidas, es decir, siguiendo el principio de conservación de la masa debe existir una equidad entre los parámetros de entrada y salida. Por lo que en los lodos se tiene:

Q_{Lodos totales} = Lodos primarios + Lodos secundarios

Q_{Lodos totales} = 15 + 10 = 25 L/d

$$DBO = DBO_{\text{lodos primarios}} + DBO_{\text{lodos secundarios}}$$

$$DBO = 171 + 272 = 443 \text{ g/d}$$

$$SST = SST_{\text{lodos primarios}} + SST_{\text{lodos secundarios}}$$

$$SST = 304 + 113 = 417 \text{ g/d}$$

Para cumplir con el balance de masa se pueden expresar las unidades de flujo másico $[M T^{-1}]$, de esta manera se cumple la equidad.

Entrada:

$$Q = 1,720 \text{ L/d}$$

$$DBO_{\text{Total}} = 488 \text{ g/d}$$

$$SST = 468 \text{ g/d}$$

Salida:

$$Q = Q_{\text{Sedimentador secundario}} + Q_{\text{lodos}}$$

$$Q = 1695 + 25 = 1720 \text{ L/d}$$

$$DBO_{\text{Total}} = DBO_{\text{Total sed sec}} + DBO_{\text{Total lodos}}$$

$$DBO_{\text{Total}} = 45 + 443 = 488 \text{ g/d}$$

$$SST = SST_{\text{sed sec}} + SST_{\text{lodos}}$$

$$SST = 51 + 417 = 468 \text{ g/d}$$

La Figura III-11 muestra el diagrama general de balance de masa de la planta piloto, donde se muestran los valores que se espera obtener en el efluente de cada unidad a lo largo del tren de procesos con los datos promedio de la Tabla III-3. También se resumen estos valores en la Tabla III-6.

Tabla III-6. Resumen del balance de masa en el tren de tratamiento de agua

Parámetro	Unidad			
	Tanque de igualación	Biodigestor	Biodisco	Sedimentador secundario
Q [L/d]	1720	1705	1705	1695
DBO_T [g/d]	488	318	45	45
[mg/L]	284	186	26	27
SST [g/d]	468	164	164	51
[mg/L]	272	96	96	30

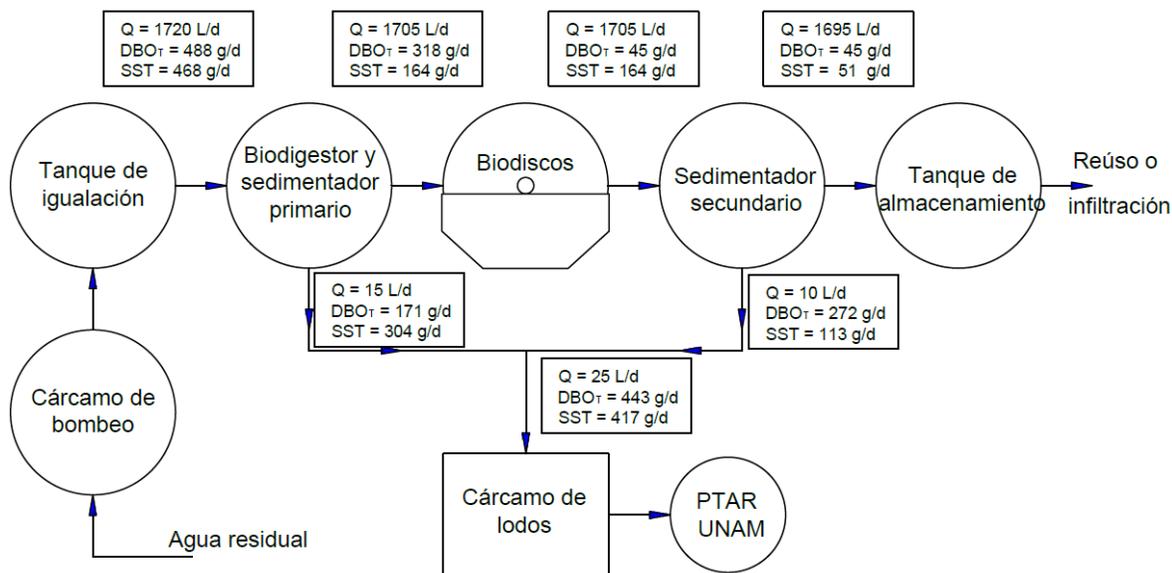


Figura III-11. Diagrama de proceso y balance de masa por componente de la planta piloto

Con este balance se diseña cada unidad, sin embargo, para la etapa de construcción se debe realizar con anticipación la distribución espacial dentro del predio destinado al proyecto al igual que los niveles de operación y el flujo hidráulico. Esto con el fin de optimizar costos en dicha etapa, al igual que tomar decisiones oportunas y eficientes. Como parte de este capítulo se muestran las figuras III-22 y III-23, en la primera se presenta la vista en planta del terreno con la obra a realizar, así como las conexiones para cada unidad del sistema y se puede comparar con la Figura II-2 correspondiente su estado original (sin proyecto). La segunda figura hace referencia al perfil hidráulico requerido para el funcionamiento de la planta a gravedad, se muestran los niveles de operación y excavación que dependen de las condiciones del suelo, ya que al ser de tipo basáltico se considera suelo duro, limitante en la profundidad de dichas excavaciones. La Figura III-9 muestra el isométrico del tren de tratamiento de agua, donde se observa la distribución de las unidades en el terreno.

Cárcamo de bombeo

La primera modificación realizada en la instalación de evacuación de aguas residuales del edificio fue el desvío del drenaje hacia un cárcamo de bombeo a partir de un registro construido sobre el albañal original (Figura III-12). Para el cárcamo se usó un tanque de polietileno de alta densidad con capacidad de 600 litros. Éste requirió de una excavación de aproximadamente 1.30 metros de profundidad y 1.20 metros de lado y fue colocado sobre una plantilla de concreto simple y reforzado lateralmente con un muro de tabique junteado con mortero. La bomba instalada es Little Giant de tipo sumergible de 1/3 HP modelo 6E-CIM con reserva de 100% y tiene la capacidad de

suministrar un gasto aproximado de 100 litros por minuto a una altura de 5 metros según la curva de rendimiento proporcionada por el fabricante (Anexo IV), donde se observa que la altura máxima de trabajo es de aproximadamente 7 metros.

La operación de la bomba es por medio de electroniveles, los cuales fueron instalados en el cárcamo de bombeo y en el tanque de igualación. Además, otra ventaja que ofrece esta bomba es su altura física (aproximadamente 25 cm) ya que permite contar con un nivel de agua mínimo en el tanque de hasta 15 cm. De acuerdo al gasto de diseño obtenido ($1.7 \text{ m}^3/\text{d}$) se previó que la bomba funcionaría 3 a 4 veces al día.

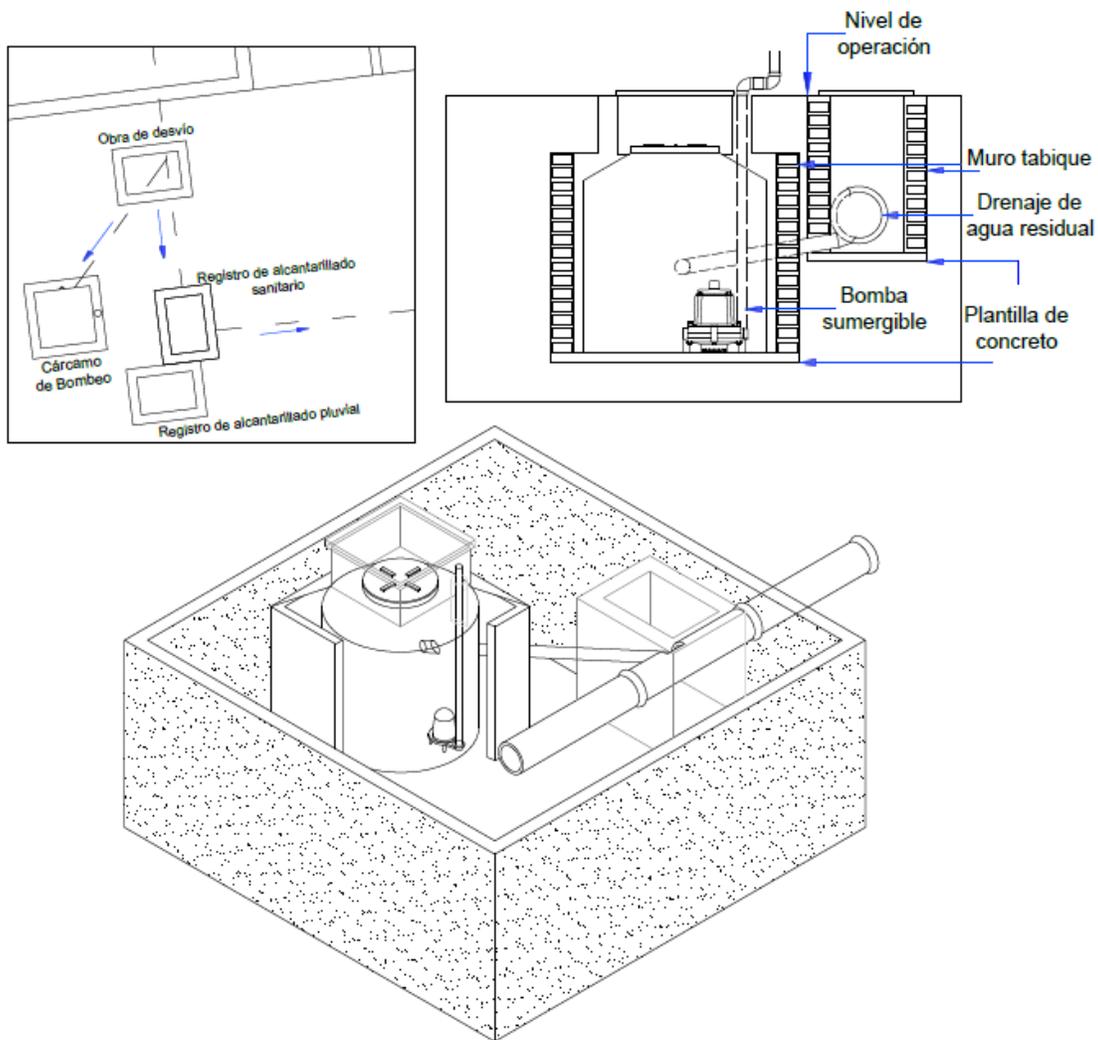


Figura III-12. Obra de desvío del agua residual y cárcamo de bombeo

Tanque de igualación

La capacidad se determinó con los cálculos para un tanque de igualación de una planta de tratamiento de aguas residuales, pero siguiendo el comportamiento del promedio de las curvas de descarga que se muestran en el Anexo I. Para determinar el volumen del tanque de igualación se programó una simulación en hoja de cálculo de acuerdo al balance de masa de esta unidad y del cárcamo de bombeo. Es decir, se consideró un volumen efectivo del cárcamo de 400 litros, de acuerdo a la instalación de electroniveles y a la profundidad de excavación; se obtuvo un promedio horario de la captación de agua residual en el cárcamo tomando en cuenta los cinco días aforados, cuando el volumen acumulado es aproximadamente igual 400 litros en el cárcamo, la bomba transfiere este volumen al tanque de igualación. Este último suministra un gasto constante las 24 horas de 72 litros por hora. La simulación del funcionamiento del tanque de igualación realizada para 5 días se muestra en las Figuras III-8 y III-9.

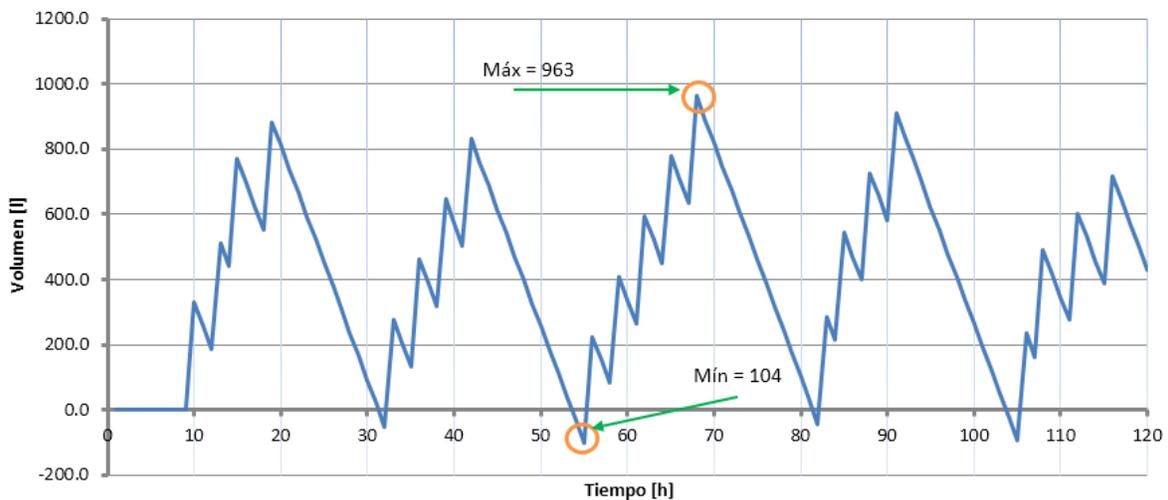


Figura III-13. Curva de balance volumétrico en el tanque de almacenamiento

La Figura III-13 muestra el balance volumétrico en el tanque de almacenamiento de acuerdo al funcionamiento de la bomba. Debido a que no existe un volumen negativo, los valores negativos se consideran déficit de volumen. La capacidad del tanque se obtiene con la suma del valor absoluto de los valores máximo y mínimo de la simulación.

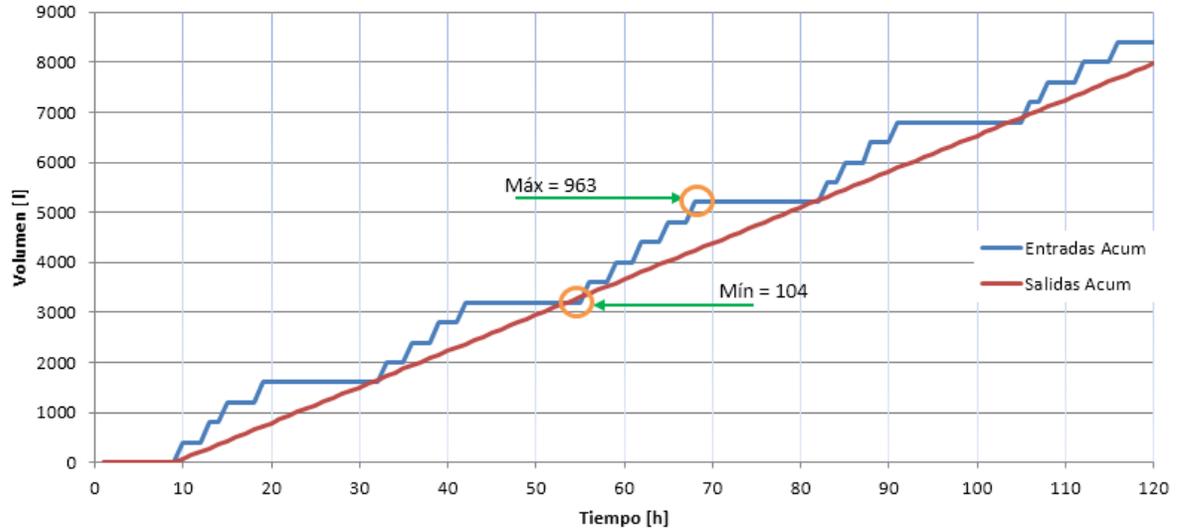


Figura III-14. Curvas masa de entradas (azul) y salidas (rojo)

El volumen de igualación requerido para este proyecto es de aproximadamente 1066 litros. El valor máximo registrado en la simulación fue de 963 litros, mientras que existe un déficit máximo de 104 litros para suministrar un gasto constante de 71 L/min. Sin embargo, se elige un tanque de 1100 litros por ser el de capacidad comercial aproximada superior.

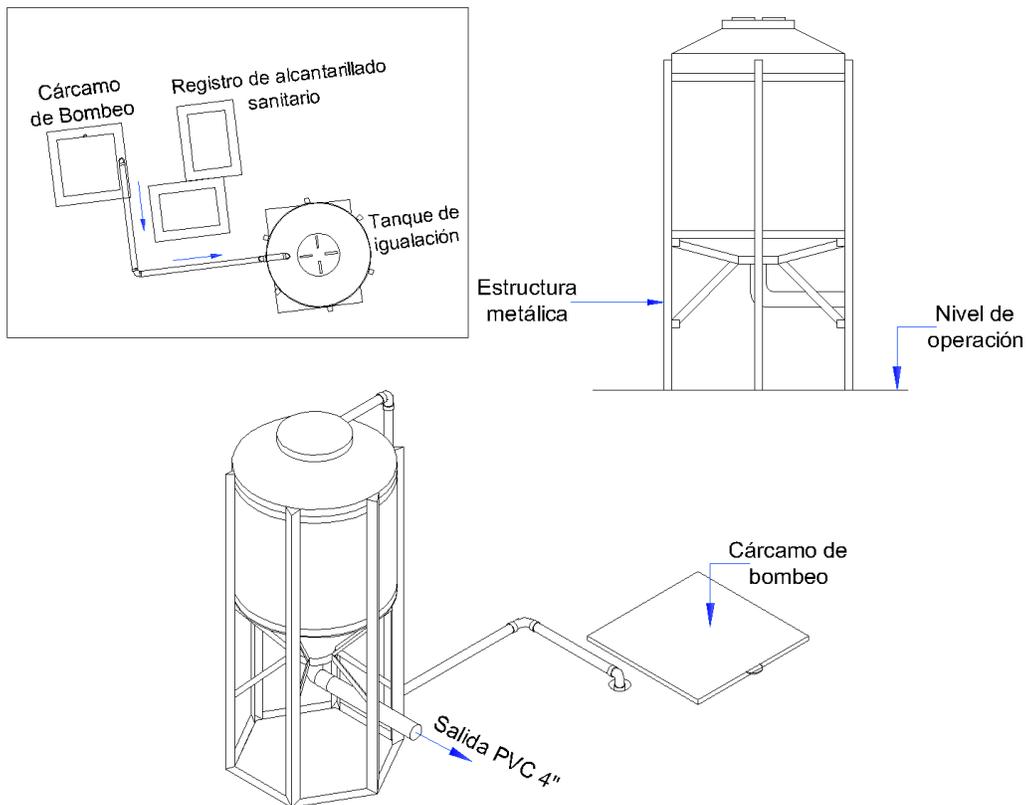


Figura III-15. Configuración del tanque de almacenamiento en la planta

La Figura III-15 muestra las características del tanque de almacenamiento. Esta unidad es de forma cónica invertida y cuenta con una elevación de 80 cm sobre el nivel del terreno para garantizar el flujo por gravedad en todo el sistema, la forma cónica de la tolva se propuso en el diseño para evitar el asentamiento de sólidos en el fondo.

Selección y funcionamiento del biodigestor primario

El biodigestor del sistema permite reducir la materia orgánica y retener la entrada de sólidos al biodisco. Su selección se basa principalmente en las recomendaciones por parte de la empresa Rotoplas®, ya que cuenta con estudios basados en la generación de aguas residuales de tipo doméstico. El funcionamiento de esta unidad es parecido al de una fosa séptica común, retiene más del 70% de sólidos suspendidos, disminuyendo alrededor del 30% de la materia orgánica (DBO). Las ventajas con respecto a las fosas comunes que presenta el fabricante son: (1) la facilidad de extracción de lodos por principios hidráulicos (sin suministrar energía eléctrica o mecánica); y (2) la capacidad de desarrollar una biopelícula de microorganismos anaerobios que mejoran la calidad del efluente al degradar materia orgánica soluble presente en el agua residual.

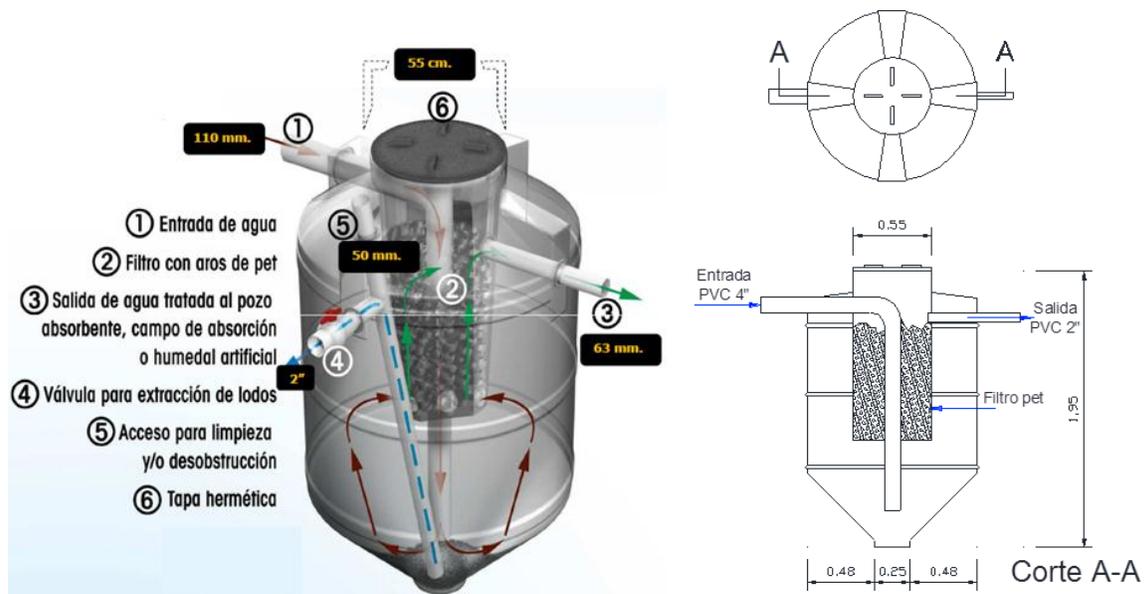


Figura III-16. Izq. Componentes del biodigestor autolimpiable (Rotoplas®). Der. Corte transversal. El tratamiento comienza con la entrada del agua residual en el punto (1), posteriormente el agua llega al fondo del tanque, donde los sólidos grandes sedimentan, y pasa a través del filtro con aros de pet (2) hasta el tubo de salida (3). La diferencia de nivel hidráulico entre la tubería de salida de agua tratada (3) y la correspondiente a la extracción de lodos (4) permite la evacuación de lodos sin suministrar energía mecánica o eléctrica. En caso de obstrucción de la tubería de lodos se cuenta con un acceso para limpieza (5) que permite eliminar dichas obstrucciones.

Con base en un estudio realizado por el Colegio de Ingenieros Ambientales de México al cual titularon *Evaluación del biodigestor autolimpiable BDA-1300*, (2007) se determinó el uso de un tanque de 1300 litros de capacidad, ya que puede tratar la generación de aguas de 50 personas en oficinas, el tratamiento es anaerobio y se lleva a cabo por bacterias fijas en el material de fijación (PET) dentro del tanque. La Figura III-16 describe el funcionamiento del biodigestor y presenta el corte transversal correspondiente a la circulación del agua residual. La instalación en el sistema para este proyecto se muestra en la Figura III-17.

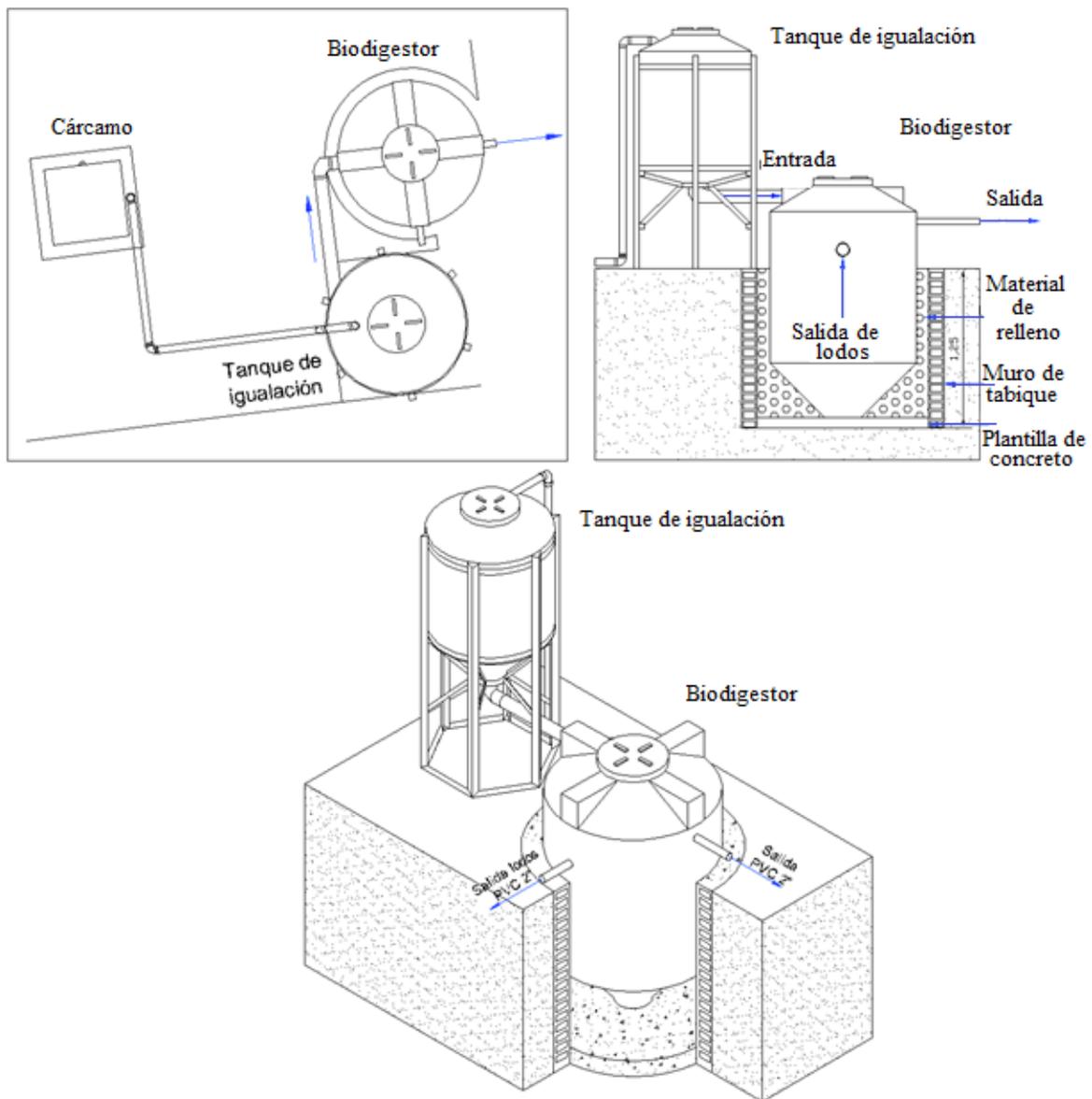


Figura III-17. Instalación del biodigestor en la planta piloto

El manejo de lodos no se detalla en las figuras y debido a los alcances de este proyecto no se efectúa tratamiento, sólo se trasladan a la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria ubicada en Av. Cerro del Agua por medio del alcantarillado.

Biodisco

El arreglo del biodisco cuenta con puntos de obtención de muestras en cada una de las tres etapas del equipo para determinar su rendimiento a lo largo del tanque. Además, se instaló una tubería para las demasías, con el fin de evitar el desbordamiento del agua y se aprovecha para hacer una recirculación hacia el cárcamo de bombeo para usarse en los fines de semana, ya que el gasto descargado se reduce significativamente (casi nulo).

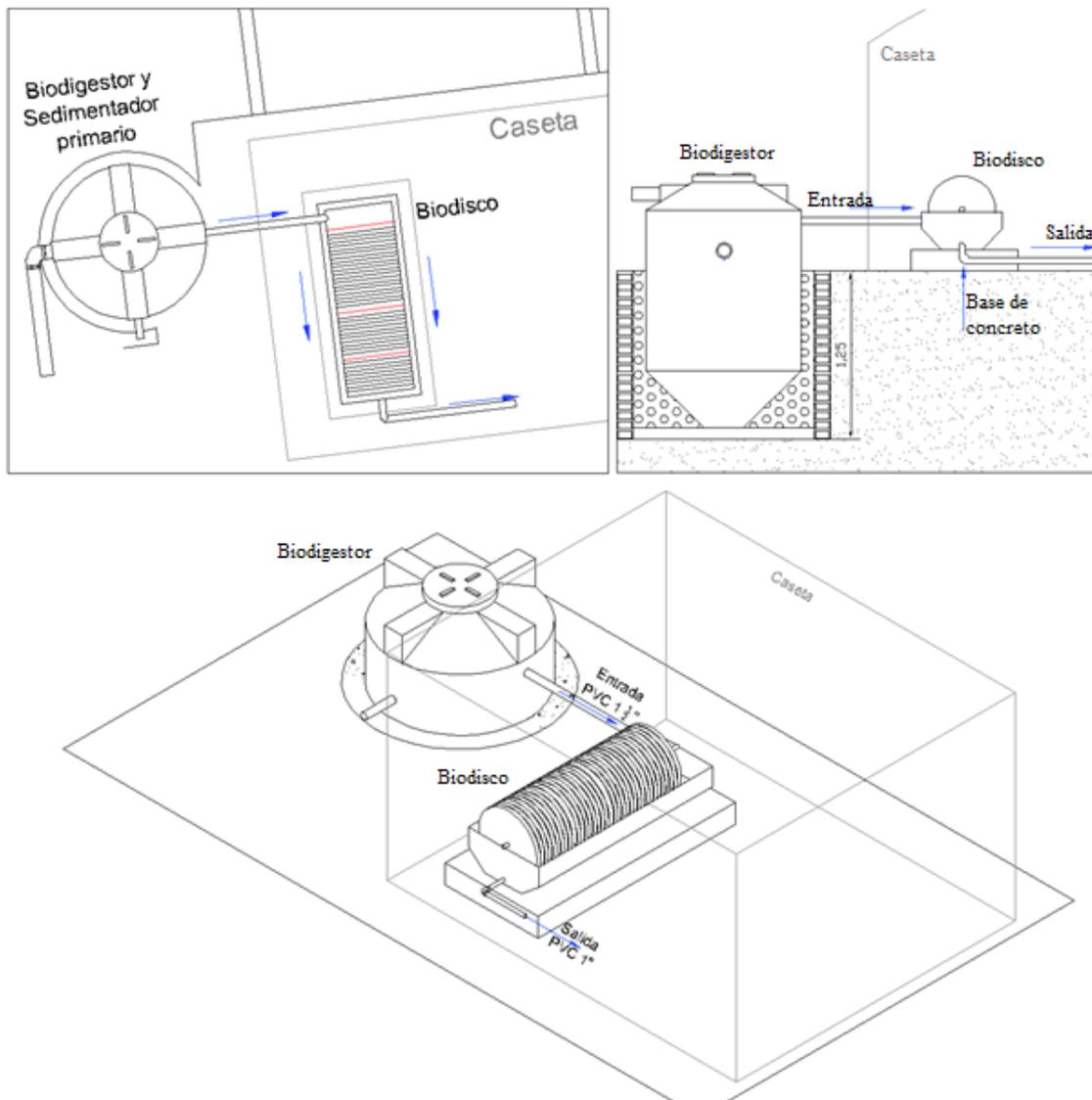


Figura III-18. Vistas del biodisco de la planta piloto

Los cálculos para esta unidad se encuentran descritos en el capítulo III.3.1, su ubicación e instalación en el sistema se muestran en la Figura III-18.

La salida del efluente del biodisco se encuentra en la parte inferior de la última etapa y está controlada por una válvula de compuerta que restringe la salida del efluente, permitiendo el llenado del tanque y el control del tiempo de retención en el mismo.

Sedimentador secundario

El tanque de sedimentación se encuentra instalado en una excavación de un metro de profundidad, consiste en una tolva de las mismas características que el tanque de igualación, a la cual se le adaptaron dispositivos de entrada y salida de agua y lodo. Dichos dispositivos se realizaron siguiendo los mismos principios del biodigestor. Sin embargo, este diseño resultó no adecuado para aplicarse a un sedimentador secundario ya que se registraron problemas de operación apenas una semana después de entrar en funcionamiento debido a la generación de gases, densidad de lodos, tiempo de retención, etc. Los detalles de esta falla se encuentran en el capítulo V.3.

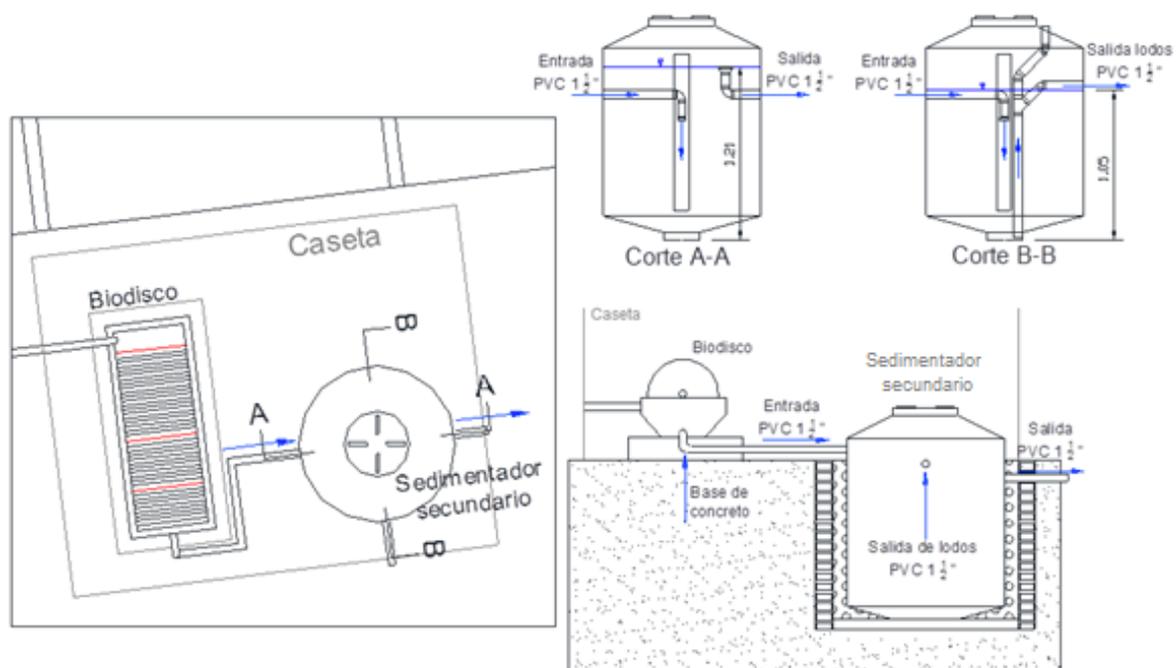


Figura III-19. Configuración del tanque de sedimentación secundaria

La Figura muestra la colocación del tanque sedimentador secundario; los lodos, al igual que la purga del sedimentador primario (biodigestor), no son tratados, sólo colectados y transportados a la planta de Ciudad Universitaria.

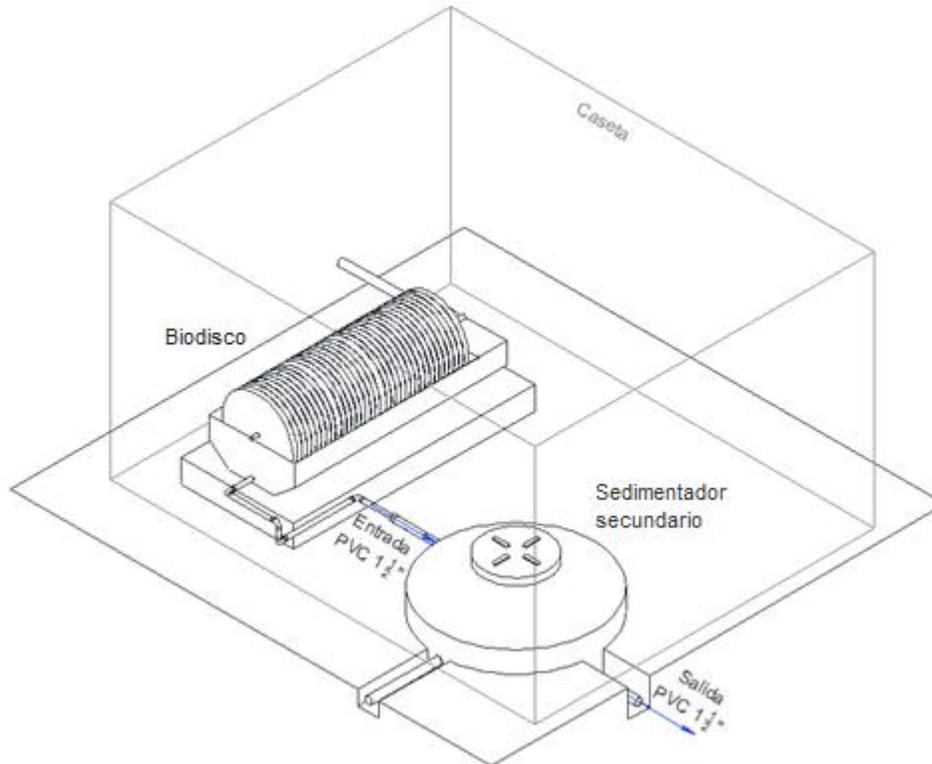


Figura III-20. Instalación del tanque de sedimentación secundaria

Cisterna de agua tratada

El tanque de almacenamiento del efluente tratado tiene una capacidad de 2 m³ y es básicamente una cisterna colocada a un lado del sedimentador secundario, suficiente para almacenar el agua tratada de un día y permitir la aplicación de hipoclorito de calcio para la desinfección.

La cisterna cuenta con un tubo de demasías para evitar el desbordamiento del agua tratada. Cabe señalar que su uso en servicios está restringido por la calidad del efluente del sedimentador secundario, ya que puede generar problemas de sedimentación, color u olores. Sin embargo, no se ha instalado aún el compartimento de pastillas de cloro en la entrada a la cisterna para el contacto con el agua tratada ni las mamparas que definen el flujo del agua en la cisterna a fin de garantizar la mezcla y el tiempo de contacto. La realización de estos trabajos se llevará a cabo una vez alcanzados los valores de contaminantes fijados por la NOM-003-SEMARNAT.

La Figura III-21 corresponde a la cisterna de almacenamiento.

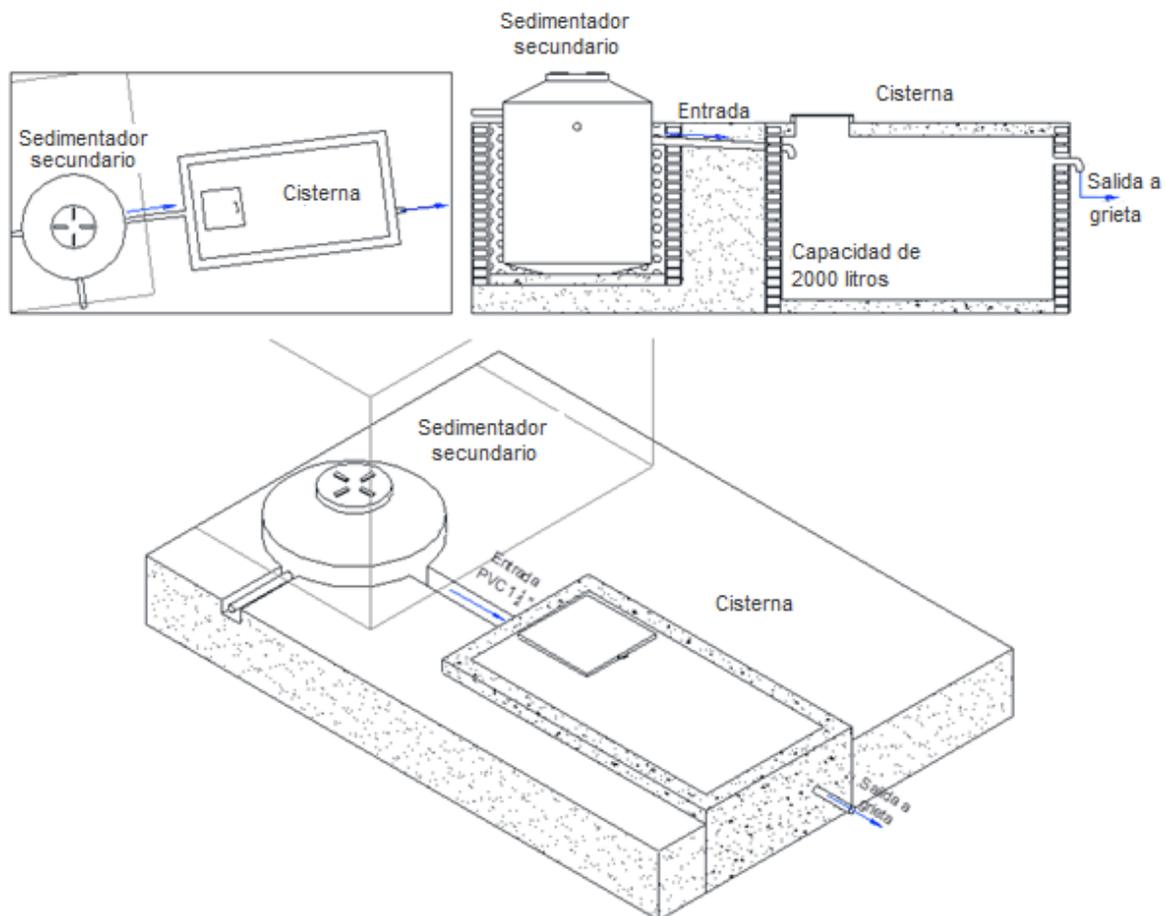


Figura III-21. Vistas de la cisterna de almacenamiento del agua tratada

III.3.2. CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA PILOTO

Para realizar la etapa de construcción se efectuó la programación de obra (Tabla III-7) donde se detallan los tiempos de ejecución de cada actividad considerada importante incluyendo el inicio de las pruebas de funcionamiento. La etapa de construcción de la planta piloto comenzó el lunes 15 de agosto del 2011 y concluyó hasta el 14 de octubre del mismo año, contando como mano de obra con un maestro albañil y un ayudante. La fecha de comienzo de esta etapa según la planeación hecha previamente (Tabla III-1) fue a partir de abril, sin embargo, la adquisición tomó más tiempo

de lo esperado (4 meses), según el proveedor por falta de materia prima en la fábrica, lo que retrasó las actividades de la obra.

Durante la construcción, en la excavación para la colocación del biodigestor, se encontró que el edificio cuenta con una fosa séptica. Dicha fosa no tiene registro dentro de los documentos y planos del edificio, sin embargo, los valores de los parámetros evaluados en los estudios preliminares para este proyecto muestran de manera evidente la saturación de la misma y explica también las observaciones de los comportamientos de las descargas extraordinarias registradas durante el aforo (Anexo I). Considerando que la fosa séptica limitó la profundidad de la excavación, se cambió la configuración de las unidades en el predio respetando, lo mejor posible, la distribución original. Cabe mencionar que el área de terreno a utilizar se redujo debido a la necesidad de instalar las escaleras de emergencia a la DICyG, mismas que están orientadas hacia el área jardinada donde se desarrolló este proyecto. Sin embargo, se cumplió con el perfil hidráulico necesario para garantizar el flujo a gravedad y se presenta en la Figura III-23.

Las instalaciones hidráulicas se concluyeron sin contratiempo, terminando con las pruebas de funcionamiento realizadas en la semana comprendida entre el 10 y 14 de octubre, tiempo que permitió hacer las correcciones correspondientes como la reparación de fugas en las tuberías de conexión. La programación de obra se presenta en la Tabla III-7. La distribución final se muestra en la Figura III-22 donde se puede observar que los cambios son ligeros.

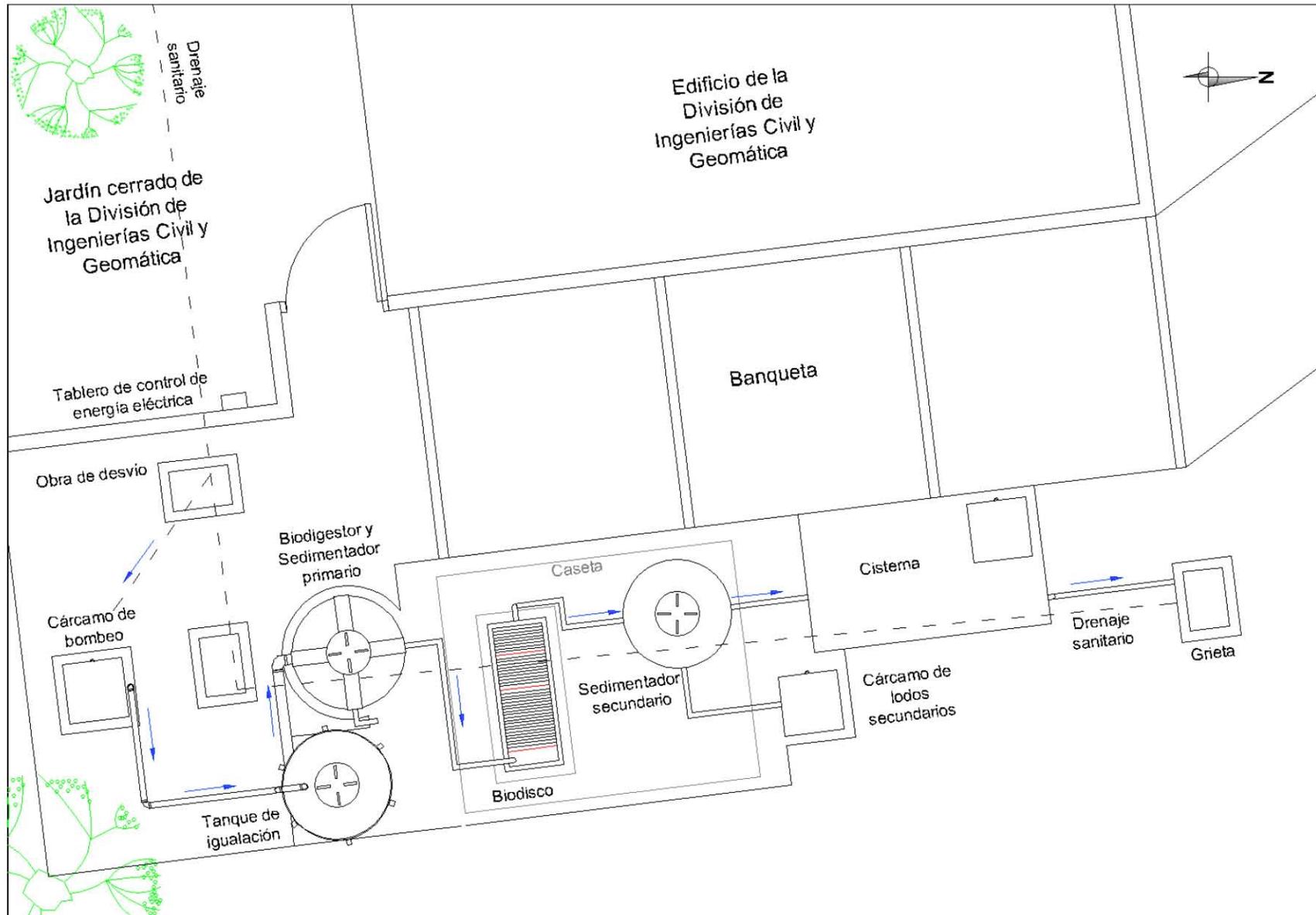


Figura III-22. Vista en planta de las unidades de la planta (distribución final) después de los ajustes propuestos en el capítulo III.4

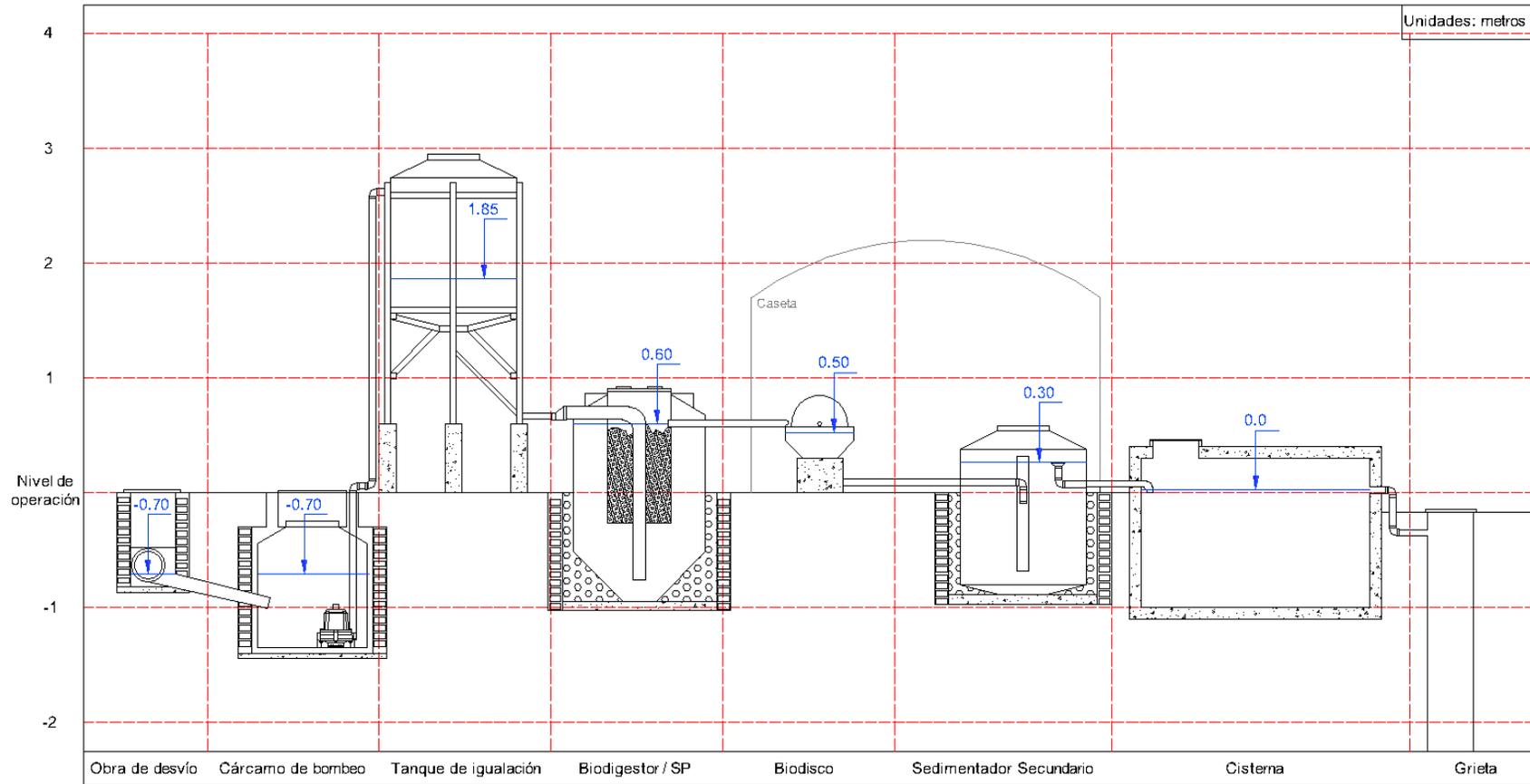


Figura III-23. Perfil hidráulico de la planta piloto (elevaciones finales) después de los ajustes necesarios descritos en el capítulo III.4

Tabla III-7. Programación de obra de la planta piloto

Programación de obra													
Actividades	Agosto												
	15	16	17	19	22	23	24	25	26	29	30	31	
Cotización de mano de obra	■	■											
Excavación e instalación del cárcamo de bombeo			■	■	■								
Excavación e instalación del biodigestor						■	■	■					
Plancha de concreto para caseta									■				
Excavación e instalación de sedimentador secundario										■	■	■	
Septiembre													
	01	02	05	06	07	08	09	12	13	14	19 a 30		
Excavación del cárcamo de lodos	■												
Plancha para estructura		■											
Excavación e instalación de cisterna			■	■	■								
Armado de caseta						■	■	■					
Instalación de biodisco									■	■			
Obra de desvío									■	■			
Instalación de tubería y conexiones de la planta												■	
Octubre													
	03	04	05	06	07	10	11	12	13	14			
Instalación eléctrica	■	■	■	■	■								
Pruebas de funcionamiento						■	■	■	■	■			

Los costos de inversión de esta planta fueron \$86,255.00 y se encuentran desglosados en la Tabla III-8.

Tabla III-8. Costos de inversión del proyecto

Concepto	Costo
Biodigestor (1,300 litros)	\$ 6,617.00
2 Tolvas (1,100 litros)	\$ 5,044.00
Tinaco (600 litros)	\$ 1,152.00
Caseta (3.0 x 2.44 x 2.25 [m])	\$ 8,876.00
Material de construcción	\$ 15,245.00
Material de instalación hidráulica	\$ 10,008.00
Material de instalación eléctrica	\$ 6,863.00
Subtotal	\$ 53,805.00
Mano de obra	
Albañilería	\$ 25,850.00
Electricidad	\$ 3,000.00
Plomería	\$ 2,500.00
Herrería	\$ 1,100.00
Subtotal	\$ 32,450.00
TOTAL	\$ 86,255.00

Es importante hacer énfasis que en este proyecto se utilizó el sistema CBR almacenado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería, aunque se sabe que la inversión inicial para este sistema es mayor que los convencionales (lodos activados) precisamente por la adquisición de la unidad de biodiscos. La tendencia europea en el uso de biodiscos y filtros biológicos actualmente se enfoca al tratamiento de aguas residuales domésticas, por lo que el uso de estos equipos forma parte de sistemas compactos de tratamiento que ofrecen rendimientos altos tratando de cumplir con las normas correspondientes. Se cotizó un sistema de tratamiento compacto con base en biodiscos similar al empleado tomando como base el gasto a tratar, se identificó el sistema llamado HERVA modelo UH-1.5 comercializado en Europa con las siguientes especificaciones por parte del proveedor:

Incluye los siguientes elementos:

- Depuradora compacta HERVA UH-1,5 con tecnología de biodiscos.
- Motor para giro de los biodiscos.
- Sistema de calefacción para calentamiento del agua en inviernos fríos.
- Programación horaria de la depuradora.
- Documentación y planos de instalación.
- Garantía de 12 meses.

No incluye:

- Decantador primario o fosa séptica sobre la que instalar la depuradora HERVA UH-1,5.
- Transporte.
- Instalación ni puesta en marcha

El costo de adquisición cotizado el mes de mayo de 2012 fue de 5,463 € + IVA, aproximadamente \$ 96,695.00 + IVA al tipo de cambio correspondiente a la fecha de cotización. La Figura III-24 muestra el sistema instalado y su capacidad de tratamiento es de 1.35 m³/d considerando una concentración de DBO de entrada de 300 mg/L y una superficie de contacto de 34 m².



Figura III-24. Sistema de tratamiento compacto HERVA modelo UH-1.5 (cortesía de SANDE Y DIAZ, SL)

El avance de obra se puede observar en la Figura III-25, donde se aprecia la modificación paulatina del terreno del proyecto.



Figura III-25. Fotografías de la etapa de construcción del proyecto. (A) Terreno antes de la construcción del proyecto; (B) excavación para el cárcamo de bombeo; (C) instalación del biodigestor y excavación del sedimentador secundario; (D) cisterna y plancha de concreto de la caseta; (E) armado de la caseta y, (F) estado actual del proyecto.

El impacto visual del espacio modificado no resulta adverso, la circulación peatonal es casi nula y no se entorpecen trabajos de riego del personal encargado de esta área. La banqueta se amplió con la finalidad de servir como ruta de evacuación del edificio. El tablero de control de energía eléctrica se encuentra ubicado en la parte posterior del edificio para evitar contacto con personas ajenas a la DICyG o funcionamiento de la planta piloto. La piedra extraída en la excavación se apiló en la parte posterior de la caseta y la cisterna para restringir el acceso a la planta.

III.3.3. RECOMENDACIONES DE OPERACIÓN

La etapa de operación de la planta se basa principalmente en el funcionamiento del biodisco, por tratarse de un tren de tratamiento con base en la oxidación de la materia orgánica, principalmente. Sin embargo, los fenómenos ocurridos en el proceso anaerobio del biodigestor afectan de manera directa el rendimiento del CBR al tener la capacidad de retener los sólidos hasta por seis a doce meses según el fabricante. En la operación de la planta la extracción de lodos está en función de la etapa de operación (periodo escolar o vacacional), aunque se considera que el reactor funciona básicamente como un sedimentador primario. Tomando en cuenta lo anterior se describe a

continuación la estabilización, recomendaciones de operación y mantenimiento, problemas y parámetros monitoreados resultado de la investigación bibliográfica para sistemas de biodiscos con diámetros mayores a un metro. La operación de la planta objeto de esta tesis se detalla en el ANEXO IV.

Estabilización del sistema. De acuerdo con investigaciones realizadas por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 1996) una vez que se arranca el sistema de biodiscos, al tercero o cuarto día se observa que la película biológica ha comenzado a formarse. Después de 2 o 3 semanas la película adquiere un color entre café y gris, aproximadamente se requieren 2 o 3 semanas más para que las bacterias nitrificantes aparezcan en las últimas etapas del biodisco. Una vez estabilizado el sistema, la planta opera durante largos periodos de manera ininterrumpida. Las etapas mínimas recomendadas para el tratamiento de aguas residuales con base en biodiscos son tres, al existir separación entre éstas también existe una diversidad en la población microbiana.

Mantenimiento. La operación y mantenimiento de sistemas de tratamiento con base en biodiscos juega un papel importante en la vida útil del equipo por lo que debe ser bien ejecutado para evitar problemas, como el desprendimiento excesivo de biopelícula o, peor aún, el colapso del sistema.

Una de las actividades diarias de control es la inspección del equipo. Se recomienda que una vez al mes se lleve a cabo una rutina para mantener el equipo en óptimas condiciones de operación; entre las actividades a realizar se encuentran:

- Monitorear la temperatura de los rodamientos a fin de identificar sobrecalentamientos que puedan afectar la flecha del biodisco.
- Verificar la visualmente la alineación de la flecha, al igual que no existan ruidos anormales en el rodamiento del motor.
- Revisar que los motores no tengan calentamientos anormales. En el presente proyecto se cuenta con un solo motor.
- Si existen derrames alrededor del sistema motriz y de la flecha principal, se deberán revisar los niveles de aceite del reductor de velocidad y del sistema de la cadena motriz.
- Revisar que no existan daños en los empaques o sellos.
- Revisar la tensión de la banda y,
- Mantener limpia el área de trabajo.

De igual manera es recomendable la protección de la unidad CBR frente a fenómenos meteorológicos (sol, lluvia, viento, etc.). Esto se logra mediante la instalación de cubiertas, generalmente metálicas, diseñadas cuidadosamente para evitar la escasez de oxígeno en el sistema y permitir los servicios de inspección y mantenimiento. Además, se debe contar con equipos de repuesto, fundamentalmente otro motor.

Problemas de operación. Durante las dos primeras semanas de operación, es normal que se presenten desprendimientos, debido a que es una etapa de aclimatación de los organismos a la superficie del medio. Si los desprendimientos son severos durante o después del periodo de estabilización, es posible que exista una escasez de nutrientes o presencia de tóxicos que motiva una inestabilidad en la adherencia. Si esta situación se presenta, es necesario investigar la causa del problema mediante pruebas de laboratorio y encontrar la solución adecuada (IMTA, 1996). En un estudio realizado en la Universidad de California (Taicheong & Stenstrom, 1979) se reportó un desprendimiento excesivo de la biopelícula en el sistema de biodiscos después de la cuarta semana de arranque debido a la mezcla de gran cantidad de cloro contenida en la alberca universitaria con el agua residual usada en la investigación.

Cuando se presente una excesiva acumulación de lodos en el tanque, se recomienda vaciarlo para determinar el tipo de sólido existente y aplicar la mejor solución posible. Las fallas de energía eléctrica afectan severamente el funcionamiento de un sistema de biodiscos; si la falla es por más de 4 horas, la flecha del medio se debe girar $\frac{1}{4}$ de vuelta por lo menos dos veces al día para evitar que seque la biopelícula; en caso de que la falla sea por más de 12 horas ocurrirá un desprendimiento normal de la biomasa cuando la unidad sea puesta en funcionamiento nuevamente, si el desprendimiento es excesivo se tendrá que esperar el tiempo necesario para que se estabilice nuevamente el sistema (IMTA, 1996).

III.3.4. ACTIVIDADES A REALIZAR DURANTE LA ETAPA DE OPERACIÓN

Una vez revisadas las recomendaciones de operación y mantenimiento y posteriormente a la etapa de construcción, específicamente a la realización de las pruebas de funcionamiento de manera exitosa, se planearon las actividades descritas en la Tabla III-9. La operación de este proyecto en particular se divide en dos periodos: (1) operación durante el periodo laboral y, (2) la operación durante el periodo de vacaciones administrativas. La DICyG como parte de la UNAM sigue el calendario semestral; cada semestre se cuenta con un periodo vacacional de tres semanas.

Tabla III-9. Actividades en la etapa de operación del sistema

Actividad	2011		2012			
	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
2do Periodo escolar 2011						
Monitoreo de operación	■	■				
2do aforo de agua residual	■					
Ajustes		■	■			
2do Periodo vacacional 2011						
Monitoreo de operación			■			
Ajustes				■		
1er Periodo escolar 2012						
Monitoreo de operación				■	■	■
Censo de población				■		
Estudio microbiológico				■	■	■
Ajustes					■	■

El monitoreo de operación consiste en la determinación de los parámetros a evaluar a lo largo de cada periodo. En los periodos escolares se midieron los ocho parámetros descritos anteriormente, sin embargo, en el segundo periodo vacacional sólo se determinó DBO₅, DQO y temperatura debido a que el objetivo de la operación en estas fechas es el de mantener con vida la mayor cantidad posible de microorganismos de la biopelícula a fin de disminuir el tiempo de estabilización para el siguiente periodo escolar.

En virtud de que se realizó la ampliación de la DICyG con la construcción de un tercer nivel, el segundo aforo de agua residual estuvo enfocado a determinar el caudal generado por día para hacer una comparación con el aforo de noviembre de 2010. El censo de población se realizó durante el primer periodo escolar del 2012 con el fin de estimar la descarga de aguas residuales por medio de un método analítico que toma como base los criterios de diseño de alcantarillado emitidos por la CONAGUA.

El estudio microbiológico se enfocó a la determinación de la homogeneidad que existe a lo largo del biodisco, es decir, conocer de manera general la composición biológica de cada etapa. Este análisis se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa en el Laboratorio de Microscopía Electrónica, y se muestra en el capítulo IV.2.3.

Parámetros a medir y métodos. Los parámetros que se emplearon en el monitoreo de la planta para la evaluación del rendimiento del sistema, fueron los siguientes: DBO₅, DQO, STT, SST, SDT, SSe, pH y temperatura. En cuanto a patógenos, se llevaron a cabo análisis para la determinación de

huevos de helminto y coliformes. Por esta razón, fue necesario conocer los métodos de análisis a utilizar para cada uno de ellos, así como efectuar la programación de la obtención de muestras. Éstos análisis se efectuaron de acuerdo con los métodos estandarizados (APHA, 1998) y con las normas mexicanas correspondientes.

Para la DBO₅ la prueba debe sembrarse el mismo día de obtención de la muestra con el fin de evitar alteraciones en los resultados, el método recomendado es el 5120 B (APHA, 1998). Las muestras deben ser tomadas como mínimo tres veces a la semana, al igual que su análisis.

Para los STT, SST, SDT y SSe se emplea la misma muestra obtenida para determinar la DBO, utilizando la norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001, realizándose la prueba por lo menos tres veces a la semana.

Se recomienda que las pruebas de DQO se realicen diariamente, debido a que es un parámetro que sirve para conocer el comportamiento del sistema de manera rápida, en comparación con el análisis de DBO, y permite tomar decisiones en tiempo real. El método para su determinación es el llamado *dicromato de potasio*, correspondiente al número 5220 B (APHA, 1998).

En cuanto al pH y temperatura, se puede hacer uso de cualquier instrumento disponible en laboratorio para su medición, la frecuencia puede ser la misma que los anteriores parámetros por la simplicidad de su determinación.

Los análisis bacteriológicos se realizaron con base en las normas NOM-112-SSA1-1994 para coliformes y NMX-AA-113-SCFI-1999 para huevos de helminto, con una frecuencia de al menos tres veces por semana.

La Tabla III-10 muestra el programa de análisis de laboratorio para los parámetros considerados, durante los días laborables del personal del edificio.

Tabla III-10. Programa de análisis en laboratorio

Día\Parámetro	pH	T	DQO	DBO	SSe	SST	SDT	HH	Col
Lunes	x	x	x		x			x	x
Martes	x	x	x						
Miércoles	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Jueves	x	x	x	x		x	x		
Viernes	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Total	5	5	5	3	3	5	5	3	3

Como se puede observar, el control directo sobre la operación de la planta piloto está regido por la DQO ya que su determinación se conoce el mismo día; los sólidos sedimentables, que indicaron el volumen de lodos a evacuar del sedimentador primario (biodigestor); y los análisis bacteriológicos, que indican si es posible el reúso del agua tratada.

Operación de la planta piloto

En el ANEXO IV se incluye un “*Manual de operación de la planta piloto*” donde se describen las características de dicha planta, las funciones de cada unidad, el control de válvulas y conexiones, los parámetros de diseño, el mantenimiento de equipos, etcétera; con el fin de contar con un documento que sirva en el desempeño de los operadores de la planta.

La operación de la planta se divide en dos periodos, según el comportamiento de generación de agua residual en el edificio. Los resultados del monitoreo durante cada periodo de operación se muestran en el capítulo de RESULTADOS Y DISCUSIÓN de manera independiente.

IV. OPERACIÓN Y MONITOREO DE LA PLANTA PROTOTIPO

Este capítulo describe el proceso de operación de la planta efectuado por un periodo de 6 meses aproximadamente y comprende el arranque, operación, mantenimiento y ajustes realizados con el fin de lograr los mejores rendimientos del sistema. Además, las experiencias reportadas durante su manejo sirvieron como base para la elaboración del manual de operación de la planta (ANEXO IV). Como se menciona en el capítulo anterior, la operación de la planta se puede dividir en tres grandes apartados: arranque, operación durante el periodo escolar y operación durante el periodo vacacional.

IV.1. ARRANQUE DE LA PLANTA PROTOTIPO

Una vez finalizada la etapa de pruebas y correcciones de funcionamiento de los componentes del sistema, se inició con la operación de la planta piloto el lunes 17 de octubre de 2011, con un gasto de 1 litro por minuto. Se requirió de aproximadamente 4 semanas para el desarrollo completo de la biopelícula en las tres etapas del biodisco. Antes de suministrar el agua residual al sistema se llenaron los tanques con agua de la red de riego siguiendo las recomendaciones emitidas por el fabricante del biodigestor, por lo que la primera semana se observó en los primeros días un cambio de color en el material de fijación, terminando con una capa líquida viscosa en los últimos días de la misma. A partir de la segunda semana se obtuvo una capa de biopelícula de un espesor aproximado de un milímetro en la primera etapa, menor a un milímetro en segunda y nula en la tercera etapa.

A principios de la tercera semana se presentaron taponamientos en la válvula de compuerta que alimenta el biodigestor, lo que originó que los valores de los parámetros de diseño no correspondieran con los reales. El *taponamiento* (Figura IV-1) consiste en la obstrucción del área transversal de la válvula de alimentación principal por sólidos presentes en el agua residual y se ubica entre el tanque igualador y el biodigestor, afectando todo el sistema. Este fenómeno obligó al sistema a una operación manual constante que requería de la supervisión y manejo de la válvula principal para continuar con la alimentación a la planta, forzando al sistema a trabajar con gastos entre los 2 y 4 litros por minuto durante la mañana y tarde, suscitándose en el horario nocturno la misma falla debido a que no se tiene personal en este horario. Sin embargo, continuó el desarrollo de la biopelícula principalmente en la primera y segunda etapas, donde se observó su crecimiento dentro de las aberturas de los discos. Mientras tanto, la tercera etapa comenzó con el crecimiento de bacterias en el material de fijación en zonas aisladas. A finales de la cuarta semana se observó el

recubrimiento total del biodisco en las tres etapas, donde se observaron diferencias en el espesor de la biopelícula, pero no carencia de ésta.

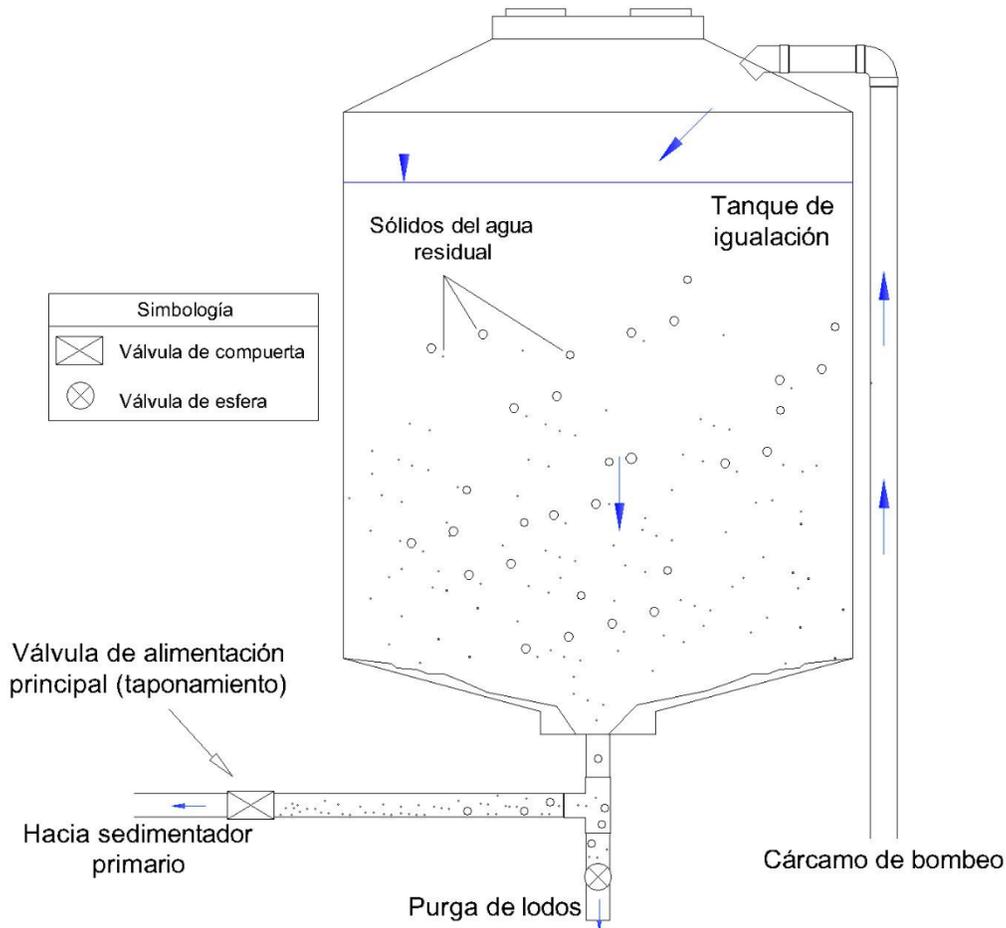


Figura IV-1. Representación del taponamiento en la válvula de alimentación principal

Las obstrucciones afectaron severamente la operación y rendimiento del sistema, se realizaron ajustes y variaciones en el mismo sin solucionar el problema. A pesar de esto, se decidió comenzar con el monitoreo de los parámetros definidos anteriormente con base en las observaciones del desarrollo de la biopelícula, es decir, se observó un espesor constante aún con los problemas de operación mencionados. La estabilización del sistema en este caso se determinó por el comportamiento de la biomasa (espesor constante).

IV.2. OPERACIÓN DE LA PLANTA

La estabilidad del proceso biológico se basó en la apariencia y comportamiento de la biomasa y se decidió comenzar con el monitoreo de la planta bajo reserva de resolver la falla por taponamiento presentada en este mismo lapso. Los ajustes realizados se muestran en cada periodo de análisis al

igual que los resultados obtenidos. Las pruebas de laboratorio comenzaron el 9 de noviembre de 2011, y actualmente se lleva un control regular de la planta. Los datos presentados en este trabajo contienen los resultados obtenidos hasta el 27 de marzo del 2012 y se reportan en dos etapas: (1) periodo escolar y (2) periodo vacacional.

La operación del sistema se describe en el manual de operación (ANEXO IV) por lo que el enfoque de este apartado es hacia las actividades desarrolladas (Tabla III-9) y los ajustes realizados al sistema en cada periodo. Los resultados obtenidos y su discusión se muestran en el Capítulo RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.2.1. SEGUNDO PERIODO ESCOLAR 2011 (NOVIEMBRE - DICIEMBRE)

El periodo comprende desde el 9 de noviembre hasta el 9 de diciembre de 2011 y la determinación de parámetros se llevó a cabo lo más apegado posible a la Tabla III-10, aunque a lo largo del mes de noviembre se tuvieron problemas de operación como la falta de energía eléctrica los días 7, 18 y 28, taponamiento en válvulas durante todo el monitoreo, mantenimiento a motor, etc. También es importante mencionar que este trabajo se enfocó principalmente a la evaluación del desempeño de proceso biológico (biodisco), por lo que se optimizaron los tiempos en las pruebas de laboratorio dando prioridad a este sistema. El gasto suministrado durante este periodo fue variable con valores entre 3 y 5 litros por minuto por lo que los valores de los resultados obtenidos no presentan una remoción constante. Si bien es cierto que el porcentaje de remoción de contaminantes en el monitoreo se muestra dependiente de la cantidad de materia orgánica suministrada (en forma de DBO), no se pudo determinar una relación directa entre muchos de los puntos monitoreados.

Durante este periodo y con el fin de contrastar con los resultados del primer aforo realizado antes de la ampliación del edificio, se organizó y realizó un segundo aforo del agua residual con el mismo procedimiento de determinación utilizado para el primero (Anexo I). Este aforo se realizó del 28 al 30 de noviembre del 2011.

En la Tabla IV-1 se observa la cantidad generada por el edificio en el horario correspondiente, el promedio fue de 2,170 litros por día. El 30 de noviembre se tienen dos valores como total, el medido y el ajustado. Este día se decidió alimentar al sistema con el agua residual del cárcamo, lo que llevó a la alteración en el aforo debido a que debe contar con cierto nivel para dirigir el agua residual directamente hacia la grieta. Así que el valor correspondiente al *medido* es la suma de los valores de la tabla y el correspondiente al *ajustado* incluye el valor promedio de cada uno de los

tres intervalos de hora de los días anteriores (7:00 a 10:00). La Figura IV-2 muestra los valores de esta tabla, en ella se observan patrones similares de las curvas obtenidas como el intervalo de máxima descarga (12:00 a 14:00) y el comportamiento con respecto al tiempo de los picos y valles.

Tabla IV-1. Segundo aforo de agua residual generada por la DICyG. Unidades [Litros]

Hora	Fecha		
	28/11/2011	29/11/2011	30/11/2011
06:00 - 07:00	0	0	0
07:00 - 08:00	130	130	0
08:00 - 09:00	240	240	0
09:00 - 10:00	130	250	0
10:00 - 11:00	150	250	160
11:00 - 12:00	100	200	170
12:00 - 13:00	230	260	230
13:00 - 14:00	250	340	90
14:00 - 15:00	140	150	200
15:00 - 16:00	200	170	170
16:00 - 17:00	110	80	150
17:00 - 18:00	110	100	170
18:00 - 19:00	70	150	100
19:00 - 20:00	0	70	70
Total	1,860	2,390	Medido = 1,510 Ajustado = 2,260

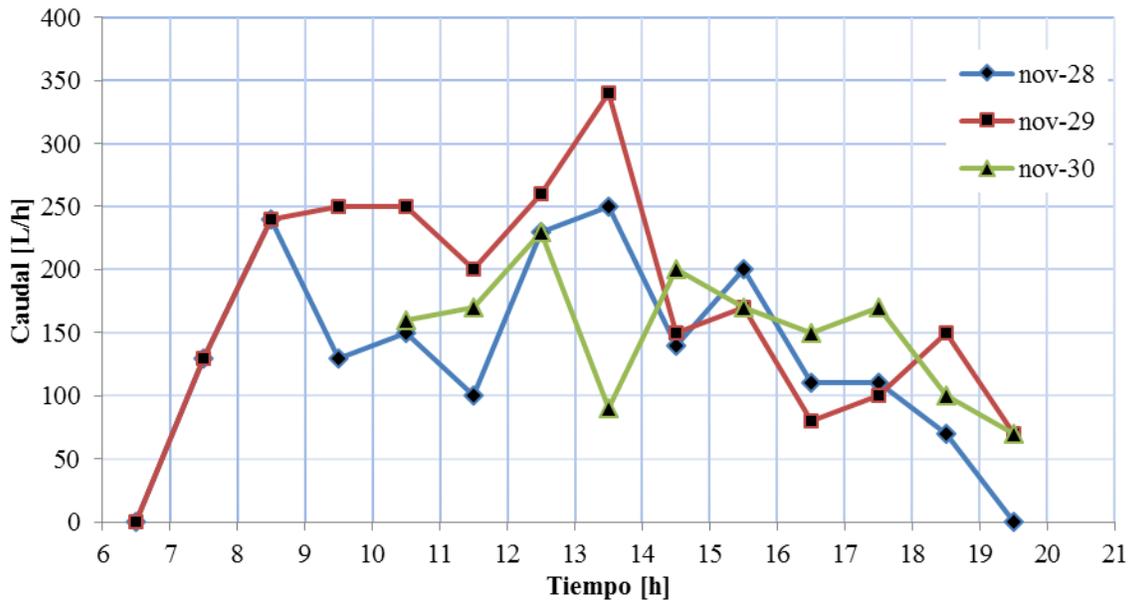


Figura IV-2. Curvas de descarga del segundo aforo

Con el fin de cumplir con el objetivo de esta actividad, la comparación entre el primero y segundo aforos indica principalmente que la generación de agua residual del edificio aumentó en un 63 % (844 L/d) al pasar de un promedio de 1,326 a 2,170 litros por día. Esto se puede atribuir al aumento de las actividades del personal del edificio, por esta razón se programó un censo realizado en el siguiente periodo escolar. La Figura IV-3 muestra gráficamente las diferencias de las curvas promedio de descarga del edificio donde se hace notable el incremento en el transcurso del día.

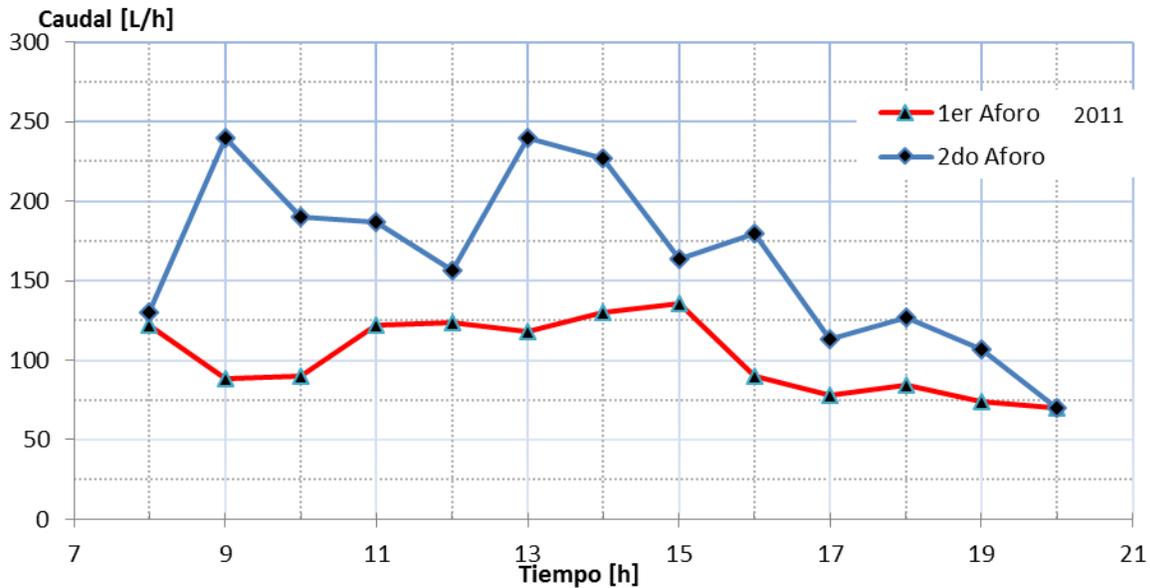


Figura IV-3. Comparación gráfica de curvas de descarga promedio de los aforos realizados

Otra diferencia radica en el patrón de comportamiento de las curvas, en el primer aforo su relación es poco similar, sin embargo, en el segundo se nota un comportamiento semejante entre estas.

El manejo de lodos se realizó durante todo el periodo vacacional, se recolectaron entre 15 y 20 litros diarios para transportarlos al alcantarillado de Ciudad Universitaria a fin de hacerlos llegar a la planta de tratamiento de la UNAM ubicada en Av. Cerro del Agua. Dicha planta no cuenta con tren de tratamiento de lodos, por lo que se destaca la importancia implementar, a largo plazo, un tratamiento de lodos para este proyecto. No se presentaron problemas de ningún tipo en cuanto a esta parte de la operación.

El periodo de operación concluyó el 9 de diciembre del 2011, los resultados se muestran variables y se consideró necesario la realización de modificaciones en el sistema, así como un censo de la población del edificio. Las unidades de la planta sin operación durante este periodo fueron el sedimentador secundario y la cisterna al no lograr una estabilización en el caudal debido a la falla por taponamiento.

Ajustes de funcionamiento

Aunque la operación durante el segundo periodo escolar fue de sólo un mes, se tomaron acciones con el objetivo de garantizar el suministro constante de agua residual al sistema, dichas acciones tienen su causa en el problema de taponamiento presentado en la válvula de alimentación al sedimentador primario (biodigestor). Se tomaron en cuenta las posibles causas que motivan este fenómeno y como conclusión preliminar se determinó que la distancia que recorre el agua residual desde los sanitarios hasta el cárcamo de bombeo es tal, que no permite una homogenización total ni la desintegración del papel sanitario. La acción realizada por su simplicidad y practicidad fue la colocación de una rejilla en el cárcamo de bombeo de una abertura aproximada de 2.5 cm y fabricada de plástico para evitar efectos de corrosión. De igual manera se colocaron avisos en los sanitarios invitando al usuario a depositar el papel higiénico en el bote para evitar su presencia en el agua residual.

Los resultados obtenidos por estos ajustes fueron buenos, pero no suficientes. El gasto proporcionado en los últimos días era de aproximadamente 3.5 litros por minuto, mayor al de diseño que es de 1.2 litros por minuto. Aún suministrando este gasto menor al inicial (5 L/min) se siguieron presentando las obstrucciones aunque en menor frecuencia. Al final de este periodo escolar de operación se identificaron problemas de operación que se atendieron en el segundo periodo vacacional del 2011, llegando a operar con un influente de aproximadamente 2.5 litros por minuto a mediados del primer periodo escolar 2012 sin erradicar el fallo por taponamiento.



Figura IV-4. Rejilla del cárcamo de bombeo

IV.2.2. SEGUNDO PERIODO VACACIONAL 2011

El segundo periodo vacacional abarcó del 19 de diciembre del 2011 al 4 de enero del 2012. La operación durante estas fechas se llevó a cabo de manera distinta al procedimiento descrito en el manual de operación. Tomando en cuenta que el objetivo principal de operación en este periodo es el de mantener activa la biomasa del CBR se determinó suficiente el monitoreo de sólo dos parámetros: DBO y DQO. Los trabajos para este periodo vacacional comenzaron el 11 de diciembre al suspender la extracción de lodos durante esta última semana de actividades con el fin de suministrar la materia orgánica suficiente para mantener la biomasa en el sistema.

Una vez transcurrido el fin de semana con su operación correspondiente se comenzó con la dilución de lodos del sedimentador primario en el tanque del biodisco, el cual trabajó como reactor batch por periodos de 24 horas.

Tabla IV-2. Fotografías de la biomasa durante el periodo vacacional

	1ª Etapa	2ª Etapa	3ª Etapa
18 - Diciembre			
24 - Diciembre			
02 - Enero			

El problema que surgió en este procedimiento fue la disminución de concentración del sustrato conforme transcurría el tiempo, es decir, aunque se diluyó durante todo el periodo en razón del 5%

de lodos, la concentración del sustrato en el tanque de biodisco resultó cada día menor. Esto originó que en los últimos días de operación se presentaran desprendimientos de la biopelícula en el biodisco, principalmente en las dos primeras etapas (ver Tabla IV-2). La tercera etapa no presentó desprendimientos, pero sí mostró cambio en la intensidad de color de la biomasa resultando mayor que las anteriores. A pesar de los largos periodos de operación del biodisco los rendimientos fueron bajos (menores al 55%) en promedio. Su discusión se describe en el capítulo de RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Después de este periodo de operación se decidió modificar el procedimiento con el fin de lograr la estabilidad de la biomasa durante las tres semanas de vacaciones administrativas. Dichos procedimientos se encuentran en el manual de operación y deberán ser evaluados en el tiempo correspondiente.

Ajustes de funcionamiento

Los ajustes realizados en este periodo tienen la misma finalidad que los efectuados en el periodo escolar, evitar el taponamiento. Se colocó en el centro del tanque de igualación una rejilla de separación de 1cm, aproximadamente, con el fin de retener el paso de sólidos hacia el exterior de ésta y permitir su sedimentación y evacuación por medio de la tubería original para evitar las obstrucciones en la válvula de alimentación. También se cambió la salida del tanque de igualación hacia el sedimentador primario, ahora se ubica en un costado del tanque y no en la parte más baja del mismo.



Figura IV-5. Ajuste en la alimentación del sedimentador primario: Izq.- Original. Der.- Ajustado. Las flechas indican el flujo hidráulico

En seguida de la salida ajustada se encuentra ensamblada otra tubería del mismo diámetro (2") que intercepta a la de alimentación después de la válvula de compuerta. El objetivo de esta tubería es la

de actuar como una trampa de aquellos sólidos grandes que se dirijan al tubo de alimentación, es decir, los sólidos grandes sedimentan en este tramo de la tubería y son evacuados por medio de la válvula de esfera que permite su concentración y salida.

El funcionamiento hidráulico se ilustra en la Figura IV-6 y su funcionamiento se evaluó en el primer periodo escolar 2012. La evacuación de lodos en el tanque de igualación es manual y no afecta directamente las características de entrada al sistema, es decir, el punto de muestreo A es representativo del influente a la planta debido a que los lodos que sedimentan en el tanque de igualación se dirigen al sedimentador primario cada 24 horas.

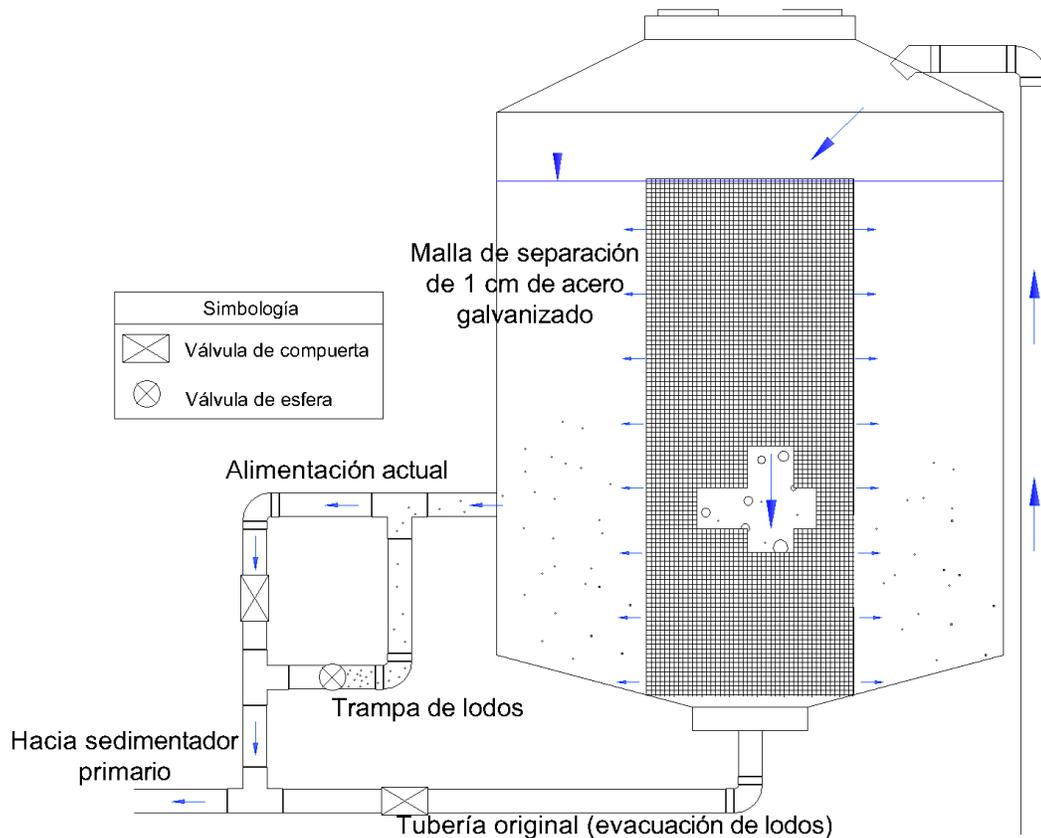


Figura IV-6. Funcionamiento hidráulico de los ajustes realizados en el tanque de igualación

IV.2.3. PRIMER PERIODO ESCOLAR 2012 (ENERO – MARZO)

Este periodo abarcó del 5 de enero al 1 de julio del 2012, sin embargo, el análisis que se reporta en este trabajo concluyó el 30 de mayo. La operación durante este periodo fue tal y como se indica en el manual de operación. Los ajustes realizados en el periodo vacacional anterior mostraron una mejoría en cuanto a las obstrucciones presentadas y al suministro del gasto al sistema, llegando a

ser de hasta 2.5 litros por minuto. También se realizaron otros ajustes al sistema con la finalidad de reducir el gasto de alimentación hasta alcanzar el de diseño (1.2 litros por minuto), los cuales se presentan más adelante en este mismo capítulo. Los resultados de los análisis y su discusión se detallan en el Capítulo V. A continuación se presentan las actividades programadas para este periodo y sus respectivos resultados.

Censo de población de la DICyG (Anexo III).

Los objetivos de este censo de población fueron: (1) estimar la cantidad de agua residual que se genera en la DICyG de manera cualitativa y (2) revisar su relación con los aforos realizados anteriormente.

En este caso la población está formada por todos aquellos individuos que cuentan con acceso a los sanitarios de la DICyG. Se restringe su uso para toda población flotante (alumnos y personal ajeno al edificio). Este censo se realizó entre los días 20 de febrero y 2 de marzo del 2012, obteniendo una población total de 60 personas en el edificio, la mayoría con actividades académicas y determinado por la hora de máxima actividad de personal en el edificio. Además de obtener el número total de personal que labora en el edificio se determinó el horario de ocupación con el fin de encontrar su relación con el comportamiento de las curvas de descarga obtenidas anteriormente.

La Tabla IV-3 muestra el comportamiento de la población en el edificio y se observa que existe un valor máximo de 60 personas a las 11:00 horas, del mismo modo se hace notar que, a pesar de que la Facultad cuenta con turno vespertino, se tiene una ocupación menor que llega a un máximo de 36 personas a las 17:00 horas.

Tabla IV-3. Censo de población horario de la DICyG

Hora	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
No. Personas	14	29	41	54	60	59	58	50	28	29	36	33	26	6

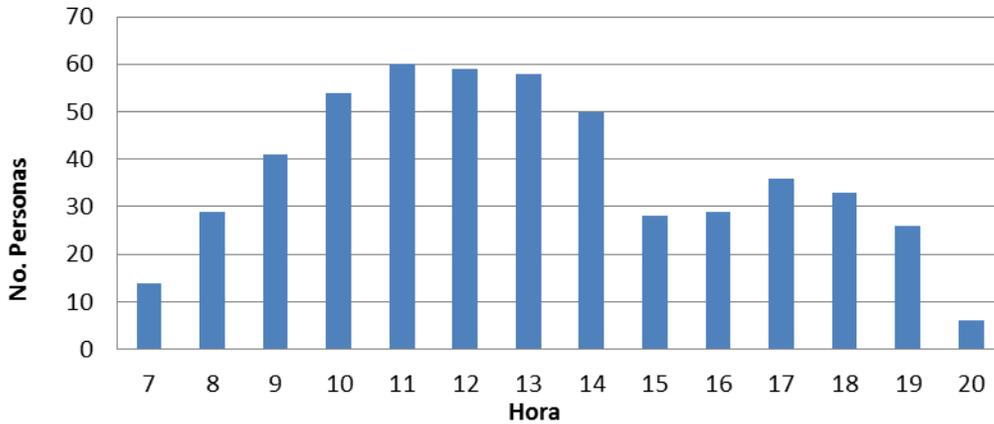


Figura IV-7. Censo de población por hora de la DICyG

El valor promedio de ocupantes a lo largo de un día común en la DICyG es de aproximadamente 38 personas, sin embargo, se tomó 60 como dato final en cuanto al número de personas que laboran en el edificio. La Figura IV-7 muestra el comportamiento de la población perteneciente a la DICyG con acceso a sanitarios despreciando por completo la población flotante (alumnos y personal sin acceso a estos servicios). Como resultado se obtuvo un gasto estimado de agua residual de 2,400 litros por día según las consideraciones descritas en la metodología. Si se toman en cuenta los aforos realizados anteriormente se observa que el valor determinado en este estudio es mayor al medido en el segundo aforo, que a su vez, es mayor al primer aforo (estimado = 2,400 > 2° aforo = 2,170 > 1er aforo = 1,326 L/día). La variación entre el valor calculado en el censo y el obtenido en el segundo aforo es de 230 litros por día que representa poco más del 10% de este último. Esta diferencia se debe a que ambas actividades se realizaron en distintas fechas, sin embargo, mantienen una relación directa.

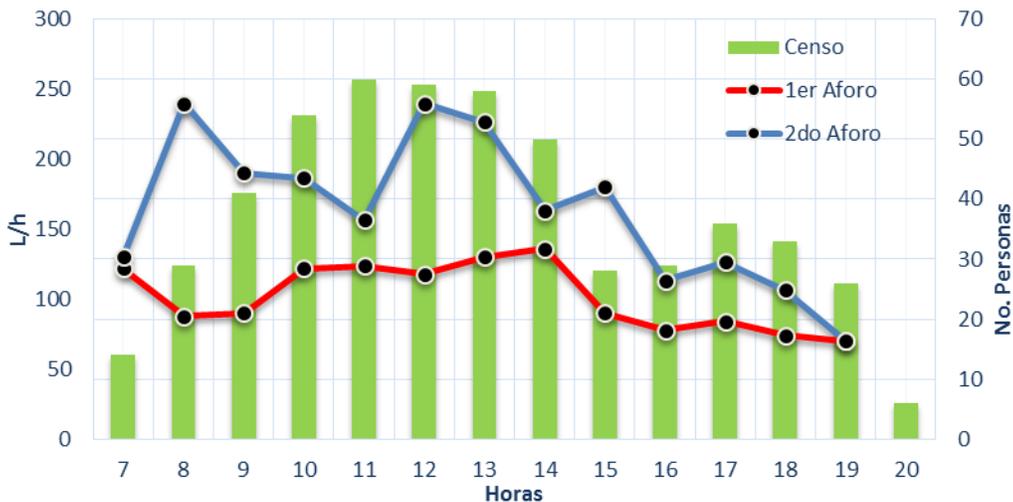


Figura IV-8. Relación entre las curvas de descarga promedio y el censo de la DICyG

Como parte de los resultados se generó también la Figura IV-8 que corresponde a la relación entre las curvas de descarga promedio de cada aforo y el censo realizado en la DICyG.

En esta figura se observa: (1) la diferencia de la generación de agua residual en los aforos realizados, resultando mayor el segundo durante todo el tiempo de medición así como la confirmación de este caudal al existir una variación de 10% con respecto al calculado con el censo y (2) que existe relación entre el comportamiento de las curvas y el número de personas del edificio.

Microscopía electrónica de barrido en el sistema de biodiscos

Objetivo

Este estudio microbiológico está enfocado a conocer, de manera general, la composición biológica de cada etapa por medio de la microscopía electrónica de barrido con el fin de determinar si existe una distribución homogénea en cada una de ellas así como los tipos de microorganismos que la constituyen.

Introducción

El microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscope) se utiliza para la observación y análisis de superficies, suministrando información de relieve, textura, tamaño y forma de muestras biológicas y minerales, es decir, crea una imagen ampliada de la superficie de un objeto. En la microscopía electrónica de barrido un cañón de electrones produce un haz de electrones enfocado con precisión, denominado haz primario. Estos electrones atraviesan lentes electromagnéticas y son dirigidos sobre la superficie de la muestra. El haz primario de electrones elimina electrones de la superficie externa de la muestra; éstos, emitidos en forma secundaria, son transmitidos hacia un colector, luego amplificados y utilizados para formar una imagen sobre una pantalla. La imagen se denomina micrografía electrónica de barrido. Este microscopio, que es especialmente útil para estudiar las estructuras superficiales de las células intactas y de los virus, en la práctica puede discriminar objetos separados por una distancia de apenas 20 nm y suele producir un aumento de 1,000 a 10,000 X (Tortora, 2007).

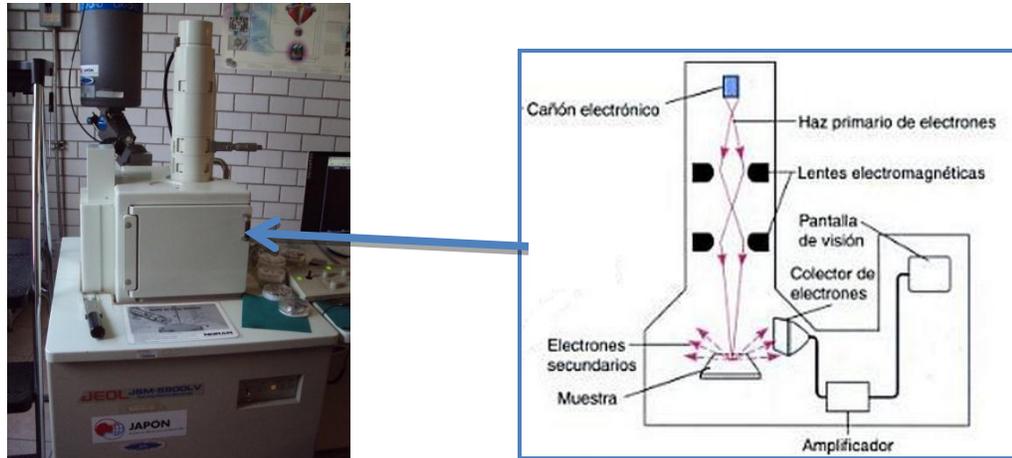


Figura IV-9. Izq.- Fotografía de un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB). Der.- Elementos principales de un microscopio electrónico de barrido.

Para determinar, de manera general, el tipo de microorganismos presentes en la biopelícula, identificando sólo el grupo al que pertenecen, se realizó el estudio microbiológico de la biopelícula del CBR en sus tres etapas con el procedimiento descrito en la metodología.

Metodología

Las muestras fueron obtenidas por medio del uso de cinta adhesiva en los discos del CBR una vez estabilizado el sistema, donde después de 3 semanas se formó una biopelícula con espesor de 1 – 4 mm dependiendo de la etapa. Para obtener buenos resultados (micrográficas), las muestras destinadas al SEM deben cumplir dos condiciones: deben estar secas y ser conductoras. Para el primero se utilizó el método de fijación y deshidratación química en laboratorio, finalizando con el secado por punto crítico, posteriormente se colocó la muestra en pequeñas cápsulas de aluminio con cinta adhesiva de carbón para propiciar la conductividad de cada muestra. Algunas de las muestras se colocaron en dos cápsulas debido a que su espesor podría limitar la calidad de las micrográficas al presentar espacios de poca conductividad.



Figura IV-10. Colocación de las muestras secas en las cápsulas de aluminio

Para una buena conductividad se realizó el recubrimiento de la muestra en bajo vacío conocido como *sputtering* utilizando oro como material conductor (Figura IV-11).



Figura IV-11. Recubrimiento de las muestras en bajo vacío utilizando oro (sputtering)

El SEM es controlado por un centro de cómputo que permite controlar la distancia, enfoque, aumento, entre otros factores para el procesamiento de las micrografías. Después de hacer conductiva la muestra, se utilizó el SEM para obtener 66 micrografías en total de cuatro puntos de la biopelícula del biodisco. Algunas muestras presentaron problemas de enfoque debido a su espesor, esto impidió obtener micrografías con mejor resolución y aumento para la determinación específica de algún microorganismo en particular.

Resultados

El estudio se realizó a mediados de marzo y se obtuvieron un total de 66 micrografías, de las cuales se muestran las más representativas correspondientes a cada etapa, la caracterización se realizó con base en el tamaño y forma, identificándose bacilos, cocos, espirilas, vibrio, bacterias filamentosas, hongos, algunos protozoarios e insectos; en cuanto a los protozoos, éstos se identificaron específicamente debido a que su morfología se obtuvo de forma más detallada.

En todas las etapas se identificó el mismo tipo de microorganismos; sin embargo, la cantidad de cada grupo cambió dependiendo de cada etapa. En el caso de las bacterias flageladas de forma bacilar se encontraron grandes colonias en la primera etapa (Figura IV-12), donde se pueden observar también bacterias de forma cocoide y espirilas. Generalmente, las bacterias son los organismos predominantes en la biopelícula, la mayoría participa en la remoción de materia de contaminantes solubles. La fracción coloidal es adsorbida a la biopelícula e hidrolizada por enzimas extracelulares para su posterior uso (Mara & Horan, 2003). En un proceso de CBR, la presencia de organismos, tales como *Beggiatoa*, incrementa la acumulación de biopelícula,

favoreciendo así a la sobrecarga en la superficie del disco, y una disminución en la difusión de oxígeno (Metcalf & Eddy, 2004).

También se observa la formación de micelios que sirven de base para la fijación y colonización para las mismas bacterias, aunque en menor proporción que en las dos etapas siguientes. El micelio es una masa formada por filamentos largos de hongos llamados *hifas*. Los hongos son organismos que participan en la remoción de sustrato carbonoso de manera parecida a las bacterias heterótrofas. Sin embargo, la tasa de conversión, mucho mayor que para bacterias, propicia una significativa producción de biomasa para una cantidad dada de sustrato. Una proporción elevada de hongos en la biomasa favorece la formación de una biopelícula altamente resistente y difícil de desprender. Debido a que su afinidad por el sustrato es menor a la de las bacterias, su crecimiento es favorecido cuando el influente es concentrado (mayor a 280 mg DBO₅/L) y generalmente en la superficie, donde hay mayor concentración de sustrato (Gray, 1989). Además, los bajos valores de temperatura y pH favorecen su desarrollo con respecto a las bacterias. Algunos forman trampas para capturar protozoarios y nemátodos controlando un poco su propagación (Bitton, 2011).

En la segunda etapa (Figura IV-13), se encontraron macroinvertebrados (insectos y gusanos) envueltos por biopelícula. Éstos son organismos pluricelulares que comprenden el filo de gusanos (rotíferos, nemátodos, gastrotricha y oligoquetos) y artrópodos (arácnidos, tardígrados, crustáceos, miriápodos e insectos). Son organismos depredadores y detritívoros que se alimentan de la biopelícula, propician su desprendimiento, disminuyen su volumen y aceleran la mineralización. Además, son fuente de origen de enfermedades que afectan principalmente al operador del sistema. Se observan frecuentemente en los filtros percoladores, donde las larvas de insectos (por ejemplo los quironómidos, *Psychoda alternata*, *P. severini*, *Silvicola fenestralis*) que se alimentan de la biopelícula ayudan al control de su espesor, evitando así la obstrucción de los filtros por exopolímeros microbianos (Bitton, 2011). Sin embargo, en un CBR, el control del espesor de la biopelícula se controla con la velocidad de rotación (Metcalf & Eddy, 2004), por lo que la aparición de estos organismos indica un mal manejo del sistema, y se puede atribuir a la falta de energía eléctrica en algunos días de operación. Durante esta falla se observó la conglomeración de insectos (comúnmente conocidos como moscones) a lo largo del biodisco, aunque se trató de evitar su proliferación estos insectos lograron establecer larvas en el eje y entre los espacios de los discos, mismas que se desarrollaron en un lapso menor a una semana. Finalmente, se eliminó la mayoría de estos insectos con una limpieza cuidadosa del eje y en aproximadamente 2 semanas su presencia era casi nula.

En la tercera etapa (Figura IV-14) se encontró la mayor cantidad de protozoos ciliados (probablemente de la familia *Vorticellidae*). Los protozoarios son organismos unicelulares heterótrofos capaces de absorber alimento soluble y/o de engullir partículas tales como bacterias (Bitton, 2011). Su crecimiento es lento (3 a 22 horas) comparado con el de las bacterias (20 minutos) y se encuentran divididos en tres ramas: Mastigophora, Rhizopoda, y Ciliophora. Pocos estudios han identificado protozoos ciliados como los más numerosos en la biomasa (Hull et al, 1991), reportando organismos del género *Vorticella*, *Opercularia*, *Carchesium* y nadadores libres como *Aspidisca* y *Chilodonella* (Curds & Cockburn, 1970). Los protozoos asumen el papel de depredadores de bacterias y son extremadamente sensibles a la ausencia de oxígeno. Además, Vedry (1996) menciona que la acumulación de ciliados fijos incrementa el consumo de oxígeno y pérdidas de carga en filtros biológicos aireados. Otros estudios mencionan que la presencia de protozoos y otros depredadores pueden afectar el desarrollo de microorganismos con baja tasa de crecimiento, como las bacterias responsables de la nitrificación (Lee & Welander, 1994).

Se observó que existe el mismo tipo de microorganismos en cada una de las etapas, presentando diferencias en cuanto a la cantidad de cada grupo, es decir, en cuanto al grupo de bacterias se observó que su población disminuye hacia las últimas etapas. Sin embargo, el comportamiento del grupo de protozoos se presentó de forma contraria, encontrándose de forma abundante en las últimas etapas.

En el caso de los hongos se puede deducir que la digestión anaerobia anterior al sistema CBR propicia (en ocasiones de intermitencia de suministro de agua residual) un descenso en el pH del agua que, en conjunto con la cantidad de sustrato (DBO_5 media de 250 mg/L) provoca las condiciones idóneas para su desarrollo, aún con la competitividad por parte del grupo de bacterias.

Tanto el cambio de aspecto en color como de espesor se puede deducir que se debe principalmente a la variación del grupo dominante en cada etapa del CBR. Este fenómeno se atribuye principalmente a la operación del sistema, ya que en tiempo vacacional (generación de agua residual nula) se realizaron diluciones de lodos del biodigestor anaerobio con el fin de estudiar la factibilidad de este método para mantener la mayor cantidad posible de biopelícula adherida y activa en el biodisco. Esto generó que los grupos de protozoos se desarrollaran en mayor cantidad gracias a su capacidad de resistencia ante la ausencia de sustrato y al consumo de bacterias. Este análisis se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa en el Laboratorio de Microscopía Electrónica.

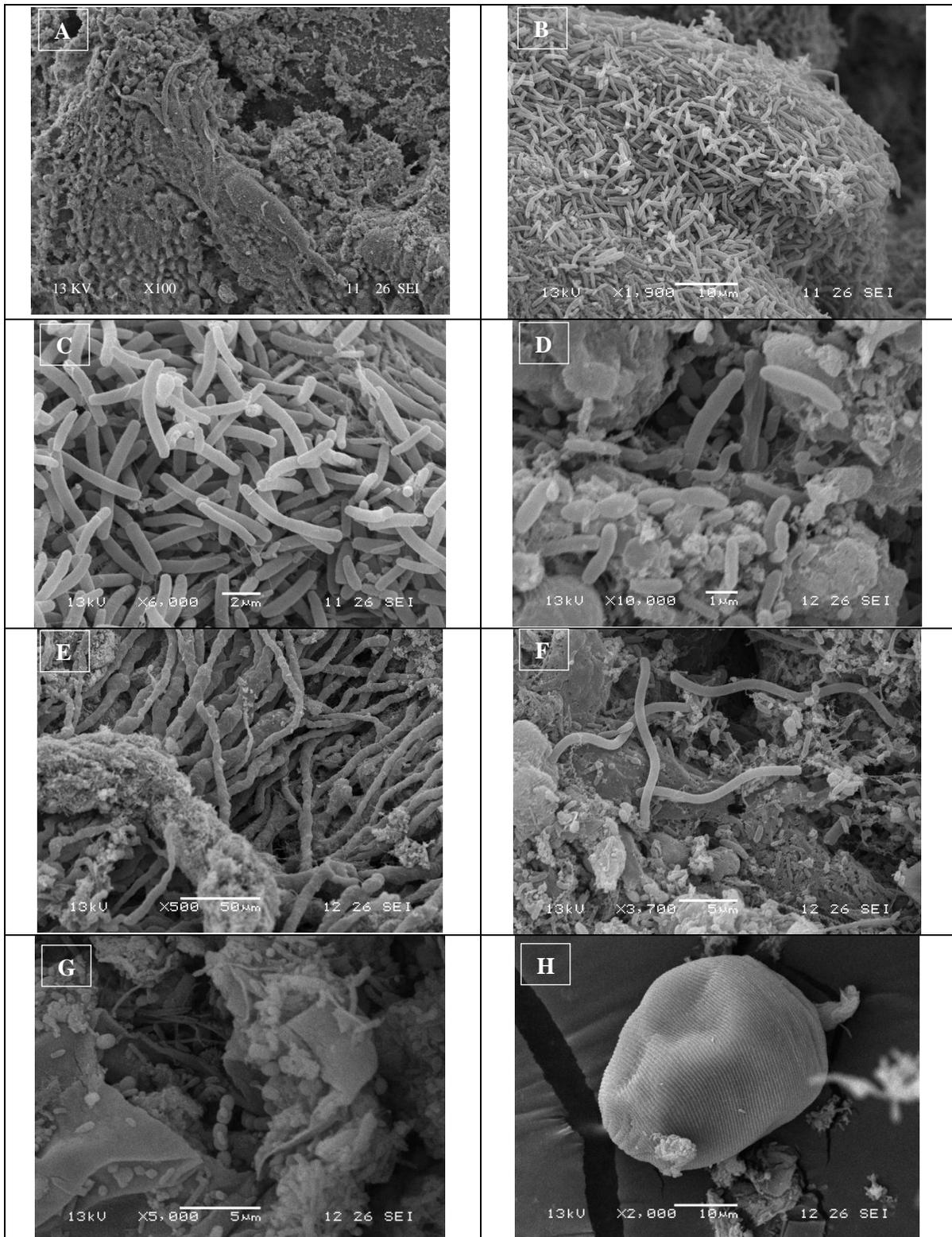


Figura IV-12. Micrografías de la etapa 1. A) Biopelícula 100 veces ampliada (100X). B) Colonia de bacterias, en su mayoría bacilos flagelados. C) Acercamiento a la colonia donde se puede observar el flagelo de las bacterias. D), F) Bacterias en su mayoría de forma bacilar, aunque también se pueden observar espirilas y cocos. E) Formación de micelio. G) Bacterias de forma cocoide en la superficie micelial. H) Protozoo encontrado en pequeñas cantidades, probablemente sea identificado como *Vorticella*.

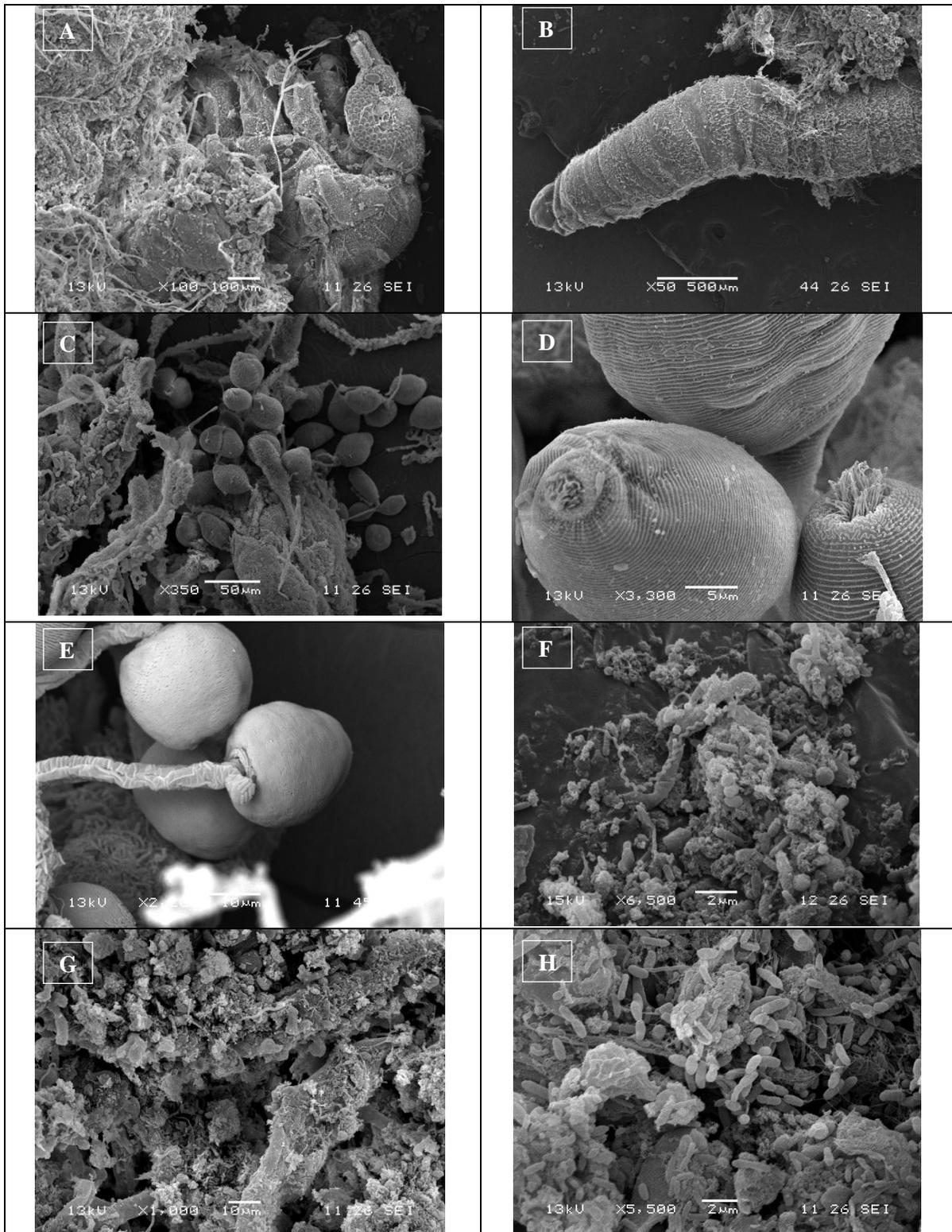


Figura IV-13. Micrografías de la segunda etapa. A), B) Insectos y/o larvas envueltos por biopelícula. C) Cúmulos formados por protozoos ciliados pedunculados. D), E) Protozoo identificado como *Vorticella*. F), H) Bacterias que conforman la biopelícula, en la primera se observa bien la espirila, en la segunda bacterias de forma bacilar y cocoide. G) Acercamiento a la biopelícula (1000X).

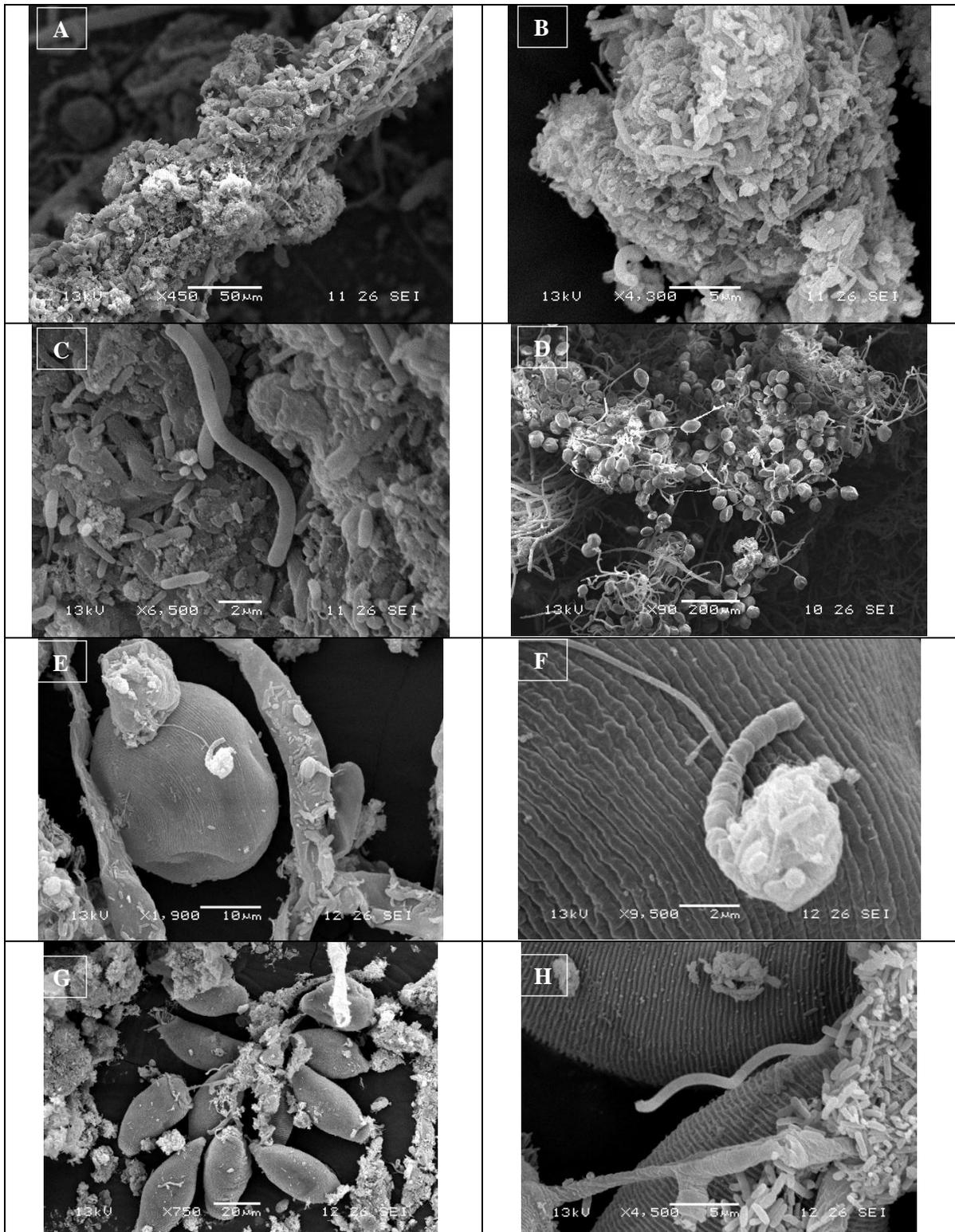


Figura IV-14. Micrografías de la tercera etapa. A) Acercamiento a la biopelícula formada alrededor de micelio (450X). B),C) Conglomeración de bacterias morfológicamente iguales a las etapas anteriores. E), F) En la primera un protozoo pedunculado ciliado, en la segunda un acercamiento al mismo, donde se identifica una cadena de cocos conocida como *Streptococcus*. D), G), H) En las primeras dos se observa un quiste de protozoos, variando en su forma esférica y ovalada, en la segunda se realizó un acercamiento al centro de éstos donde se observa bacterias con la misma morfología anterior.

Ajustes de funcionamiento

Los ajustes realizados en esta etapa del estudio incluyen el mismo objetivo que los anteriores. Se colocó una bomba de aire dentro de la tubería de alimentación al biodigestor con el fin de favorecer el paso de sólidos a través del área transversal controlada por la válvula de compuerta. Se logró anular la operación manual de la válvula a 4 litros por minuto, sin embargo, al disminuir el gasto se presenta nuevamente el taponamiento. Finalmente, se suministró un gasto de 2.5 litros por minuto con operación manual de la válvula principal.

Parece ser necesario el cambio en el tren de tratamiento de la planta de manera que se eliminen completamente los sólidos antes de pasar a la tubería de alimentación del sistema (entre el tanque de igualación y el biodigestor), aunque esta configuración requiere de inversión ya que no se puede llevar a cabo con el equipo actual, fundamentalmente por el funcionamiento del biodigestor, que no tiene la capacidad de funcionar a presión.

IV.3. ALTERNATIVAS AL MANEJO DE LODOS

Los componentes eliminados en las plantas de tratamiento de aguas residuales engloban cribado, arena, natas, sólidos y biosólidos. Los sólidos y biosólidos (comúnmente denominados lodos) resultantes de las operaciones y procesos del tratamiento de aguas residuales están generalmente en estado líquido o semisólido-líquido, y contienen comúnmente 0.25 a 12 por ciento del peso en sólidos, dependiendo de los procesos y operaciones que se utilicen. El término biosólido refleja el hecho de que los sólidos del agua residual son productos orgánicos que pueden ser utilizados después de un tratamiento con procesos como la estabilización y composta. En los casos de incertidumbre acerca de los beneficios del lodo producido se denominan simplemente sólidos.

En el proyecto actual no se proporciona tratamiento a los lodos extraídos del sistema, sólo se trasladan a la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria. Sin embargo, uno de los alcances del presente trabajo es proponer una alternativa al manejo de lodos y para esto se presenta información de manera general y relevante del tratamiento y disposición de lodos con base en la bibliografía. El objetivo es sentar las bases para, en un futuro y en la manera de lo posible, ejecutar un proyecto adecuado del manejo de lodos que disminuya los impactos ambientales adversos intrínsecos a su naturaleza.

Normatividad mexicana

En la selección del tratamiento, reúso y disposición adecuado de los sólidos se debe tomar en cuenta la reglamentación correspondiente. En México se cuenta con la NOM-004-SEMARNAT-2002 que establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final. En esta Norma Oficial Mexicana los biosólidos se clasifican en los tipos: excelente y bueno (Tabla IV-4), en función de su contenido de metales pesados; y en clases: A, B, y C en función de su contenido de patógenos y parásitos (Tabla IV-5).

El aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y la clase, como se especifica en la Tabla IV-6 y su contenido de humedad hasta el 85%.

Tabla IV-4. Límites permisibles para metales pesados en biosólidos

Contaminante (determinados en forma total)	Excelentes mg/kg en base seca	Buenos mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

Fuente: (SEMARNAT, 2003)

Tabla IV-5. Límites máximos permisibles para patógenos en lodos y biosólidos

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca	Huevos de Helminos/g en base seca
A	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 1(a)
B	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2000000	Menor de 300	Menor de 35

Fuente: (SEMARNAT, 2003)

Tabla IV-6. Aprovechamiento de biosólidos

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación Los establecidos para clases B y C
Excelente o bueno	B	Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación Los establecidos para clase C
Excelente o bueno	C	Usos forestales Mejoramiento de suelos Usos agrícolas

Fuente: (SEMARNAT, 2003)

Procesos de tratamiento de sólidos

Los principales métodos utilizados para el tratamiento de sólidos se enlistan en la Tabla IV-7. El espesamiento (concentración), acondicionamiento, deshidratación, y secado se utilizan principalmente para eliminar la humedad de los sólidos; digestión, compostaje e incineración tienen como fin tratar o estabilizar el material orgánico en los sólidos.

Diagramas de flujo de tratamiento de sólidos

La Figura IV-15 muestra un diagrama de flujo general que incorpora las operaciones y procesos unitarios enlistados en la Tabla IV-7. Como se observa, existe un gran número de combinaciones posibles. En la práctica, el diagrama de flujo usado comúnmente para el tratamiento de biosólidos involucra el tratamiento biológico (Figura IV-16). Los espesadores se pueden usar dependiendo del origen de los lodos y su proceso de estabilización, deshidratación y disposición. Después de la digestión biológica se puede utilizar cualquiera de los procesos para la deshidratación de los lodos; la decisión depende de la evaluación económica, los requerimientos de calidad y las condiciones locales. En los casos en que no se utilice la estabilización biológica, los sólidos deshidratados se someten a descomposición térmica en incineradores de chimeneas múltiples o lecho fluidizado.

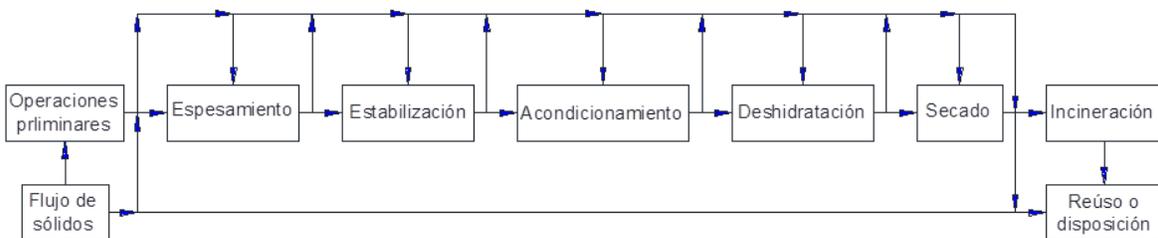


Figura IV-15. Diagrama de flujo general de tratamiento de lodos. Tomado de (Metcalf & Eddy, 2004)

Tabla IV-7. Procesos de tratamiento de sólidos

Operación unitaria, proceso unitario o proceso de tratamiento	Función
Bombeo	Transporte de lodos y biosólidos
Operaciones preliminares:	
Molienda	Reducción de tamaño de partículas
Cribado	Remoción de materiales fibrosos
Desarenado	Remoción de arenas
Mezcla	Homogenización de flujo de sólidos
Almacenamiento	Flujo homogéneo
Espesamiento:	
Espesamiento por gravedad	Reducción de volumen
Espesamiento por flotación	Reducción de volumen
Centrifugación	Reducción de volumen
Espesamiento por bandas	Reducción de volumen
Estabilización:	
Estabilización alcalina	Estabilización
Digestión anaerobia	Estabilización, reducción de masa
Digestión aerobia	Estabilización, reducción de masa
Digestión aerobia autotérmica	Estabilización, reducción de masa
Compostaje	Estabilización, recuperación de producto
Acondicionamiento:	
Acondicionamiento químico	Mejorar la deshidratación
Otros procesos de acondicionamiento	Mejorar la deshidratación
Deshidratación:	
Centrífuga	Reducción de volumen
Filtro prensa	Reducción de volumen
Camas de secado de lodos	Reducción de volumen
Humedales	Almacenamiento, reducción de volumen
Lagunas	Almacenamiento, reducción de volumen
Secado por calor:	
Secadores directos	Reducción de peso y volumen
Secadores indirectos	Reducción de peso y volumen
Incineración:	
Incineración con chimeneas múltiples	Reducción de peso, recuperación de recursos
Incineración por lecho fluidizado	Reducción de volumen
Coincineración con desechos sólidos	Reducción de volumen
Aplicación de biosólidos al suelo:	
Aplicación a suelo	Uso beneficioso, disposición
Disposición en suelo específico	Disposición, recuperación de tierras
Rellenos sanitarios	Disposición
Transporte y almacenamiento	Almacenamiento y transporte de sólidos

Fuente: (Metcalf & Eddy, 2004)

Tren de tratamiento de lodos propuesto para la planta piloto

De acuerdo a las necesidades actuales del proyecto, hasta ahora se considera que el diagrama (a) de la Figura IV-16 representa un tratamiento de lodos práctico desde tres principales enfoques: el económico, el potencial de los procesos y el espacio disponible. De manera específica, la digestión anaerobia es de los procesos más antiguos utilizados para la estabilización de sólidos y biosólidos, involucra la descomposición de materia orgánica e inorgánica (principalmente sulfatos) en ausencia de oxígeno molecular y las principales aplicaciones de este proceso son en la estabilización de lodos concentrados producidos a partir de las plantas de tratamiento de agua municipal e industrial. Además, se cuenta con gran cantidad de estudios que facilitan la comprensión de los fenómenos fundamentales, el control del proceso, el tamaño de los tanques y el diseño y aplicación de equipo.

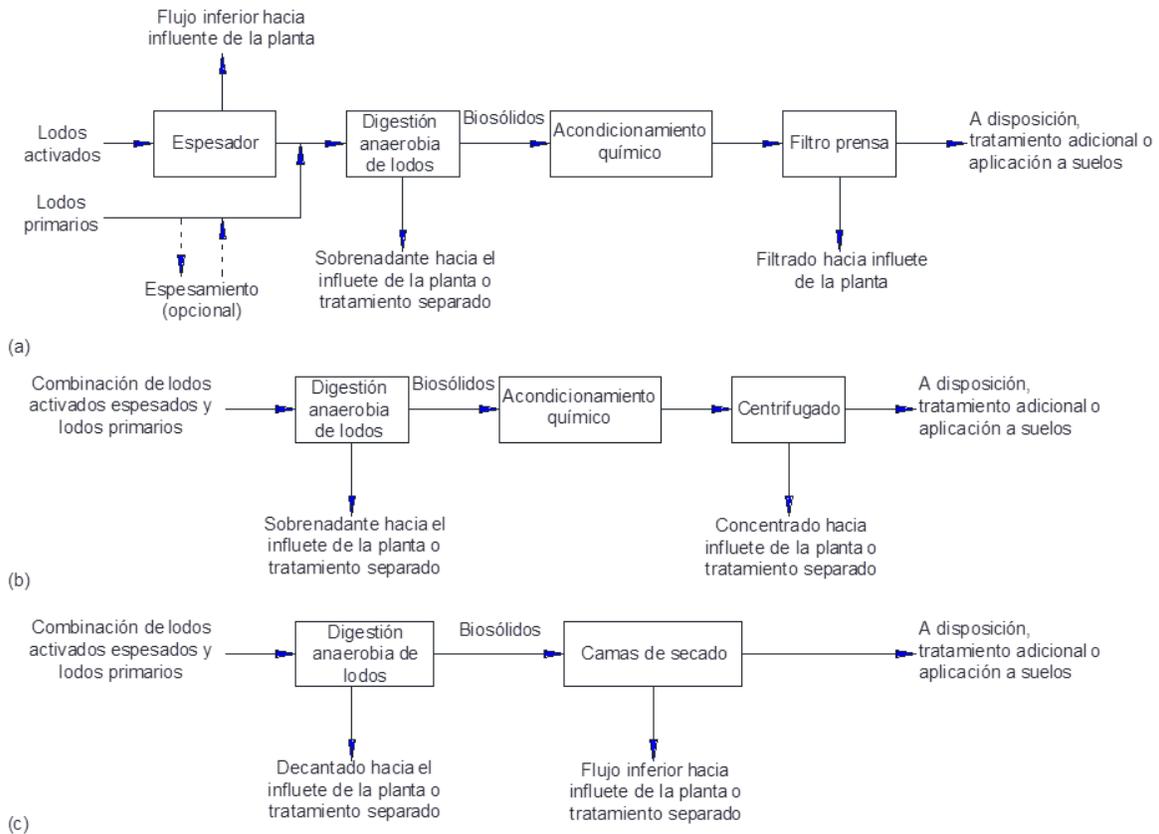


Figura IV-16. Diagrama de flujo típico para el tratamiento de lodos con digestión biológica y tres diferentes procesos de deshidratación: (a) Filtro prensa, (b) centrifugado y (c) camas de secado. En algunas plantas los flujos que son recirculados hacia las obras de captación son almacenados en tanques de homogenización para hacer la recirculación al proceso de tratamiento durante las horas de madrugada cuando la carga de la planta se reduce. Adaptado de Metcalf & Eddy, 2004.

En este proceso las reacciones químicas y bioquímicas que se presentan son: hidrólisis, fermentación (también conocido como acidogénesis) y metanogénesis. Los factores ambientales más importantes en el proceso anaerobio son: tiempo de retención de sólidos, tiempo de retención

hidráulica, temperatura, alcalinidad, pH, presencia de sustancias inhibitorias y materiales tóxicos, y la biodisponibilidad de nutrientes. Las principales ventajas y desventajas del proceso de digestión anaerobia se muestran en la Tabla IV-8. Para la fase de deshidratación se propone el uso de un filtro prensa que deberá ser diseñado y construido para este proyecto en específico.

Tabla IV-8. Ventajas y desventajas de la digestión anaerobia en la estabilización de lodos

Ventajas	Desventajas
Buena reducción de SSV (40% a 60%)	Requiere operadores experimentados
Capacidad de producción de gas metano	Pueden formarse espumas
Amplia aplicación	Tiempo de estabilización largo
Reducción de patógenos	Difícil limpieza
Bajos requerimientos de energía	Generación de olores
Reducción de la masa total	Alto costo inicial
Poca extensión de terreno	

Adaptado de (Jiménez C., 2001)

De igual manera se puede optar por realizar sólo la estabilización de los lodos y continuar el proceso en lugares específicos para ello. Tomando en cuenta la descripción del tren de tratamiento y la información correspondiente a este tema se tiene la alternativa de manejo de lodos en la Figura IV-17 . Sin embargo, se deben evaluar y contrastar distintos tipos de tratamiento para seleccionar el que otorgue mayores beneficios en cuanto a calidad, operación y economía.

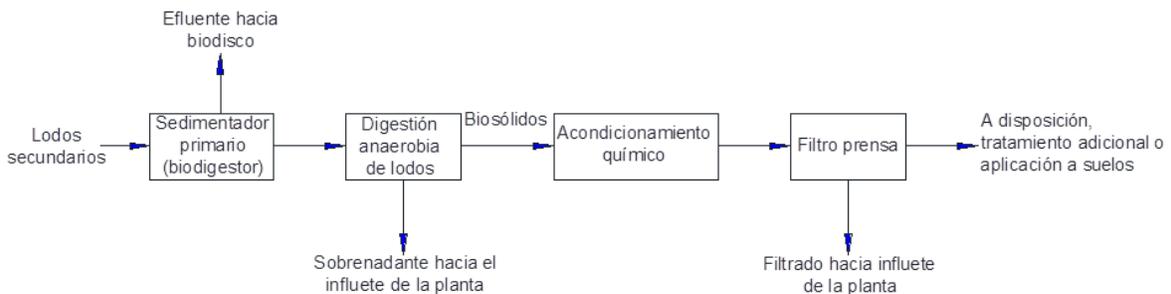


Figura IV-17. Alternativa de manejo de lodos propuesta para la planta piloto

Otro aspecto fundamental para la realización del tratamiento de lodos es el control de los olores. Es necesario conocer qué tipos de control existen y cuáles se pueden aplicar a este proyecto tomando en cuenta que se ubica en una zona transitada y a un costado de un edificio de oficinas. Otro punto fundamental a considerar es que la operación de este tren de tratamiento requiere de mano de obra experimentada, por lo que se deberá contar con un operador base.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos en las etapas de operación y monitoreo en el orden presentado en el capítulo anterior. El análisis de los datos se hace con dos enfoques principales en cada etapa: el rendimiento general del sistema y el rendimiento particular de cada elemento.

V.1. SEGUNDO PERIODO ESCOLAR 2011 (NOVIEMBRE – DICIEMBRE)

Durante este periodo se operó la planta bajo los diagramas de configuración mostrados en la Figura V-1 correspondiente a días laborables y días de asueto. El sedimentador secundario entró en funcionamiento hasta el primer periodo escolar 2012, por lo que en esta etapa no se manejan datos de este elemento.

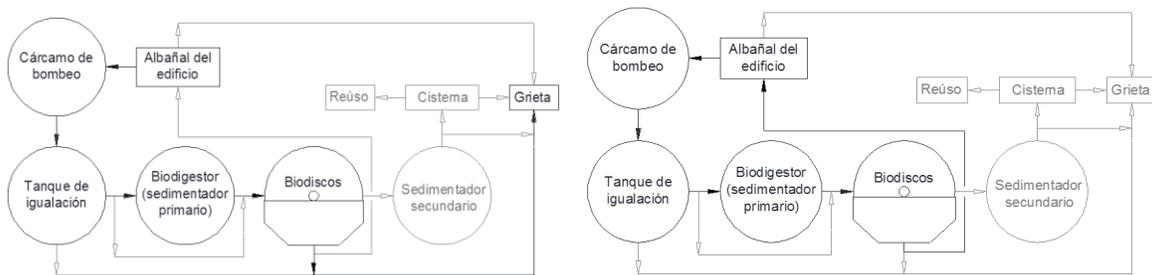


Figura V-1. Izq- Diagrama de flujo de estabilidad del biodisco. Der- Diagrama de flujo en fines de semana y días de asueto

Resultados generales

Los resultados obtenidos en cada prueba realizada en este periodo de operación se presentan en la Tabla V-1, para cada punto de muestreo se cuenta con cierto número de parámetros determinados. Estas determinaciones se hicieron lo más apegado posible a la Tabla III-10 donde se muestra la frecuencia de obtención de cada parámetro.

En la Tabla V-2 se muestra la remoción general de cada parámetro monitoreado, es decir, la remoción de contaminantes del influente (punto A) y efluente (punto C) de la planta, correspondientes a la configuración de flujo adoptado.

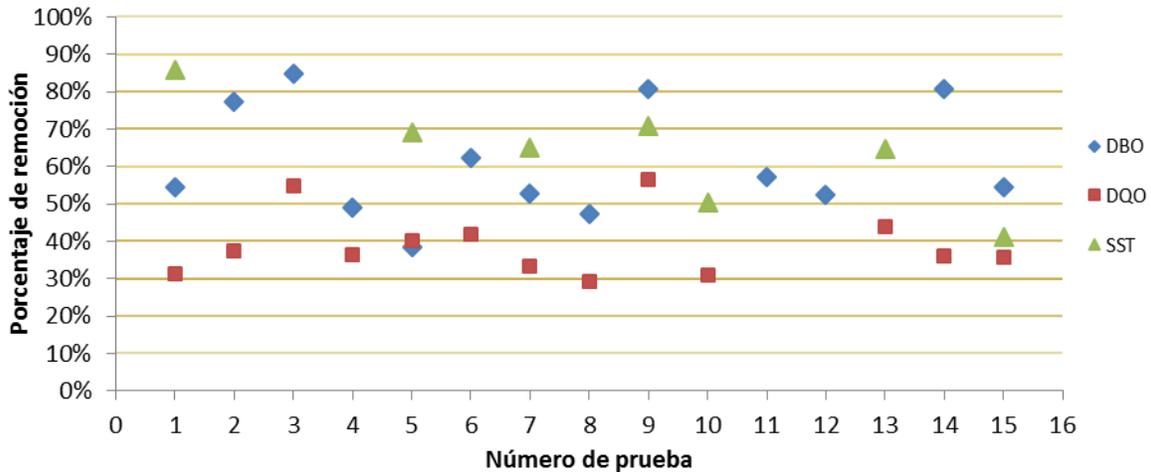


Figura V-2. Representación gráfica de los valores de remoción durante el segundo periodo escolar 2011

Con estos resultados se puede deducir que la planta piloto no alcanzó los valores calculados en la etapa de diseño, esto se debió a distintos factores generales: (1) El gasto generado resultó mayor al de diseño ($4 > 1.2$ litros por minuto), (2) existen problemas de obstrucción de tuberías y válvulas que afectan el suministro constante de agua residual y (3) el sedimentador secundario se encontró fuera de operación. La Figura V-2 muestra gráficamente el comportamiento de cada parámetro monitoreado. Dicha figura resume los resultados presentados en las tablas V-1 y V-2.

Se observa que el parámetro con mayor remoción corresponde a los SST, con un promedio de 64%, seguido de la DBO con 61% y finalmente la DQO con 39%. La dispersión de los resultados indica la falla en el sistema que puede ser por errores en la realización de pruebas, fallas de operación o inclusive, cambios en la naturaleza del agua residual (presencia de sustancias químicas contenidas en los productos de limpieza). En este caso se debe a los problemas de operación presentados ya que la obstrucción y el suministro de un gasto mayor al de diseño alteran directamente factores como el tiempo de retención y carga orgánica. También la obtención de muestras jugó un papel importante, principalmente en el cárcamo de bombeo (punto A) debido a la sedimentación de sólidos en el mismo, por lo que la muestra no siempre fue completamente homogénea. Esto se puede observar en los valores obtenidos en el punto A de la Tabla V-1.

En la Figura V-2 se observa que la remoción de los SST presenta una pendiente negativa, lo que indica la tendencia a disminuir los valores de remoción de este parámetro con respecto al tiempo. Sin embargo, las tendencias de remoción de la DBO y DQO presentan una pendiente aproximada a cero, aunque si bien esto indica estabilidad, la dispersión de los valores la rechaza.

Resultados por elemento

Hasta ahora se presentaron los resultados y problemas generales del sistema, a continuación se muestran los resultados obtenidos de forma particular para cada elemento en funcionamiento durante este periodo de operación. Esto permite identificar alguna falla particular de algún elemento de la planta y ejecutar los ajustes y presupuestos correspondientes.

La Tabla V-3 muestra los valores obtenidos en las pruebas realizadas con los datos para el sedimentador primario y se agrega una columna con los valores de remoción alcanzados en cada prueba. La Figura V-3 muestra gráficamente estos resultados, donde se aprecia que los datos no son constantes y por lo tanto no hay estabilización. En cuanto a la tendencia de remoción de cada parámetro se observa que la pendiente se muestra positiva, es decir, la remoción mejoró con respecto al tiempo en todos los parámetros que se determinaron, aunque no en la misma proporción.

En la Tabla V-4 se muestran los resultados del monitoreo del biodisco. En este elemento en particular se espera que la remoción de los contaminantes sea mayor con el funcionamiento del sedimentador secundario ya que parte de ellos se retira con la sedimentación de la biopelícula desprendida. Las muestras obtenidas en el punto de salida del biodisco (punto C) no contaron con ningún tipo de tratamiento, sin embargo, se presentan con fines de análisis. Tanto en la Tabla V-4 como en la Figura V-4 se identifican valores de remoción negativos principalmente en los SST y tiene relación directa con la producción y desprendimiento de la biomasa en el tanque. En cuanto a la DBO y DQO se observa una tendencia semejante, aunque negativa, se destaca que la remoción de DBO fue mayor a la DQO.

Es difícil identificar problemas específicos de un elemento, pues antes de esto se deben solucionar los problemas generales que el sistema enfrenta para conocer las necesidades de calidad en el efluente y analizar propuestas.

Tabla V-3. Resultados obtenidos del sedimentador primario

No.	DBO			DQO			SST		
	Entrada	Salida	Remoción	Entrada	Salida	Remoción	Entrada	Salida	Remoción
1	285	190	33%	587	492	16%	851	530	38%
2	459	260	43%	525	532	-1%	-----	480	-----
3	445	225	49%	568	542	5%	-----	306	-----
4	392	245	38%	602	516	14%	-----	150	-----
5	195	165	15%	509	454	11%	520	110	79%
6	399	205	49%	623	486	22%	-----	423	-----
7	302	162	46%	584	504	14%	545	305	44%
8	354	213	40%	596	526	12%	-----	40	-----
9	660	230	65%	930	530	43%	1060	60	94%
10	-----	-----	-----	528	481	9%	493	208	58%
11	421	250	41%	-----	-----	-----	-----	-----	-----
12	468	267	43%	-----	-----	-----	-----	-----	-----
13	-----	-----	-----	549	402	27%	791	130	84%
14	442	261	41%	557	468	16%	-----	340	-----
15	302	183	39%	621	568	9%	501	185	63%

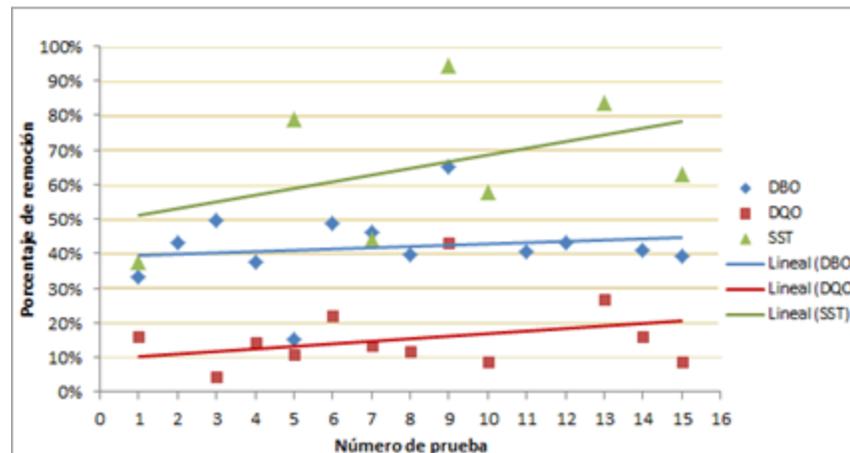


Figura V-3. Gráfica representativa de la remoción en el sedimentador primario

Tabla V-4. Resultados obtenidos del biodisco

No.	DBO			DQO			SST		
	Entrada	Salida	Remoción	Entrada	Salida	Remoción	Entrada	Salida	Remoción
1	190	130	32%	492	403	18%	530	120	77%
2	260	105	60%	532	328	38%	480	330	31%
3	225	68	70%	542	256	53%	306	225	26%
4	245	200	18%	516	384	26%	150	60	60%
5	165	120	27%	454	305	33%	110	160	-45%
6	205	151	26%	486	363	25%	423	310	27%
7	162	143	12%	504	389	23%	305	190	38%
8	213	187	12%	526	422	20%	40	250	-525%
9	230	128	44%	530	406	23%	60	310	-417%
10	0	-----	-----	481	365	24%	208	245	-18%
11	250	180	28%	-----	-----	-----	-----	-----	-----
12	267	223	16%	-----	-----	-----	-----	-----	-----
13	0	-----	-----	402	307	24%	130	280	-115%
14	261	85	67%	468	357	24%	340	305	10%
15	183	138	25%	568	400	30%	185	295	-59%

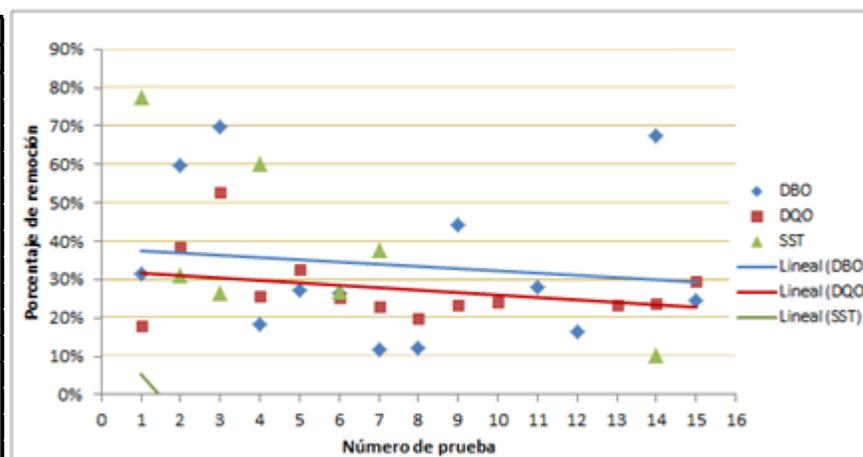


Figura V-4. Gráfica representativa de la remoción en el biodisco

V.2. SEGUNDO PERIODO VACACIONAL 2011

Durante este periodo de operación se adoptó la configuración del flujo presentada en la Figura V-5 el cual consiste en la dilución de lodos con agua del sistema de riego en el tanque del biodisco. El tiempo de retención en el biodisco fue de 24 horas, en este tiempo largo se esperaba una calidad de agua cercana a los valores permisibles de las normas. Sin embargo, la remoción no fue tan favorable debido a las condiciones de los lodos y a la operación programada. También se debe tomar en cuenta que la muestra se tomó en la salida del biodisco, sin sedimentación.

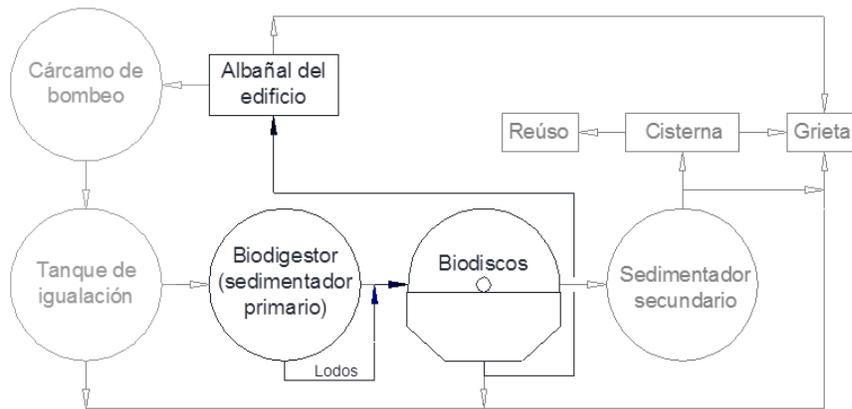


Figura V-5. Diagrama de flujo en periodo vacacional con dilución de lodos

El objetivo fue mantener la biopelícula adherida al sistema para evitar reiniciar el arranque durante el siguiente periodo escolar. Los resultados obtenidos de este monitoreo se presentan en la Tabla V-5.

Tabla V-5. Monitoreo del biodisco durante la segunda temporada vacacional 2011

No.	Fecha	DBO			DQO			Carga orgánica gDBO/d·m ²
		Entrada	Salida	Remoción	Entrada	Salida	Remoción	
1	20/12/2011	880	253	71%	1054	656	38%	4.6
2	21/12/2011	332	220	34%	711	517	27%	1.7
3	22/12/2011	122	65	47%	419	100	76%	0.6
4	23/12/2011	122	85	30%	258	119	54%	0.6
5	24/12/2011	335	132	61%	661	251	62%	1.7
6	26/12/2011	202	105	48%	156	157	-	1.1
7	27/12/2011				245	119	51%	
8	28/12/2011				157	88	44%	
9	29/12/2011				257	121	53%	
10	02/01/2012	105	58	45%	284	150	47%	0.5
11	03/01/2012	183	115	37%	241	154	36%	1.0
12	04/01/2012	164	107	35%	266	192	28%	0.9

Los valores de la Tabla V-5 se muestran gráficamente en la Figura V-6. En ésta se observa que la remoción es proporcional a la carga orgánica. Comparando las cargas suministradas con las recomendadas en el capítulo II.3 se observa que son bajas, es decir, en este periodo se suministró una carga orgánica entre 4.6 y 0.5 gDBO/d m², la Tabla II-5 maneja los siguientes intervalos: de 8 a 20 gDBO/d m² para la remoción de DBO, de 5 a 16 gDBO/d m² para remoción de DBO y nitrificación y de 1 a 2 gDBO/d m² para una nitrificación separada. Con esto se deduce que existió nitrificación durante este periodo, sin embargo, no se realizaron tales determinaciones. La razón del suministro de las bajas cargas orgánicas fue por la concentración del lodo en el sedimentador primario. De igual manera dicha concentración variaba con respecto al anterior, es decir, se extrajo el mismo volumen de lodos aunque no se tuvieron las mismas concentraciones.

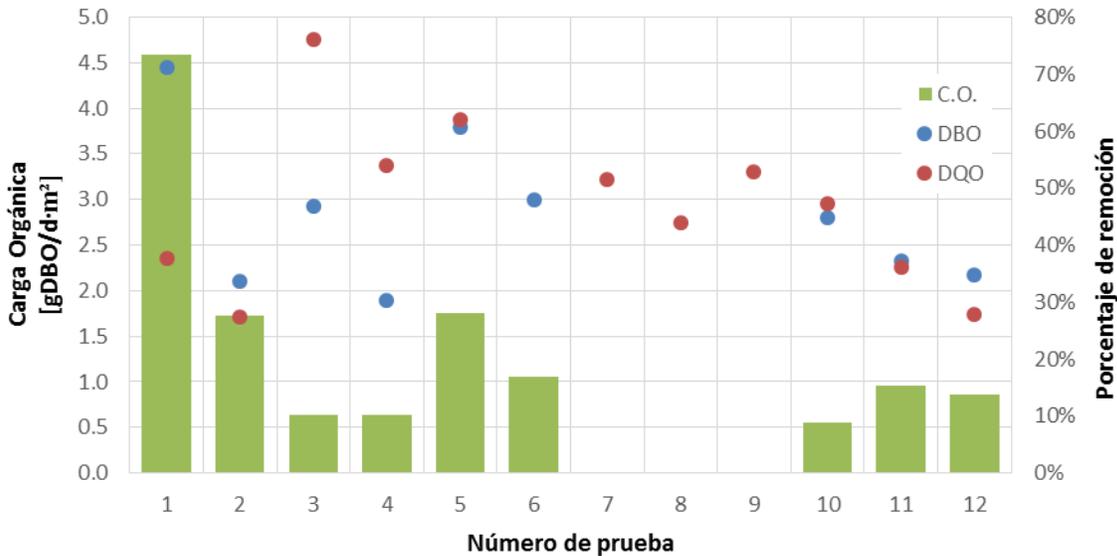


Figura V-6. Monitoreo del biodisco durante el segundo periodo vacacional 2011

Considerando las incertidumbres implícitas en este periodo de operación se observa que la política de operación al suministrar el flujo a la planta resulta ineficiente para los objetivos de estabilidad. El desprendimiento excesivo se presentó a partir de la tercer semana de operación, a excepción de la última etapa. Existen, en el manual de operación (ANEXO IV), otras políticas de suministro de flujo posibles a evaluar en los siguientes periodos vacacionales pero antes de adoptarlos se debe dar solución al problema de taponamiento. Por esta razón la primera opción a evaluar fue la planteada ya que no implica el uso de la tubería para el suministro de agua residual al biodisco.

V.3. PRIMER PERIODO ESCOLAR 2012 (ENERO – MARZO)

Como se menciona en el capítulo IV en el mismo periodo de operación la política de suministro de flujo del sistema fue la correspondiente a los días laborales y fines de semana presentados en el manual de operación (Anexo IV). Al presentarse el desprendimiento de la biopelícula en el periodo vacacional se dejaron transcurrir alrededor de 2 semanas para estabilizar nuevamente la capa biológica en los discos y se comenzaron las pruebas de laboratorio el 23 de enero.

El sedimentador secundario comenzó su operación el 13 de febrero, sin embargo, se presentaron problemas con la sedimentación y evacuación de lodos al purgar cada 24 horas (mayor a 2 horas) sin capacidad de retenerlos en el fondo lo que derivó en la generación de gases por procesos anaerobios y a presentarse entonces el fenómeno de flotación de lodos debido al gas encapsulado en los flóculos. Actualmente se analiza la manera de corregir este problema.

Durante este mismo periodo se intentó corregir el problema de obstrucción de la tubería de alimentación, los resultados de los ajustes realizados fueron perceptibles pero no suficientes, se logró reducir el gasto de operación a 2.5 litros por minuto aproximadamente pero no se erradicó el taponamiento en las válvulas de control. Aun así la frecuencia de operación de las válvulas fue de 3 veces por día.

Los resultados obtenidos durante el monitoreo en este periodo se encuentran en la Tabla V-6. El análisis de estos resultados se lleva a cabo en dos apartados, resultados generales y resultados por elemento. En ninguna de las tablas de resultados de los periodos escolares involucrados en este trabajo se incluye la carga orgánica debido a que la alimentación del biodisco está sujeta al flujo continuo del agua residual.

Resultados generales

La operación general de la planta se resume en la Tabla V-7 derivada del manejo de los datos de la Tabla V-6. En esta última se observa que la operación involucró distintos elementos para el tratamiento a lo largo del periodo, por esta razón, la Tabla V-7 muestra los resultados de acuerdo a los puntos de muestreo analizados (matriz de operación). El análisis global del sistema muestra una remoción promedio de DBO de 49% y DQO de 53%.

Los SST no presentan remoción debido al corto tiempo de operación del sedimentador secundario.

Tabla V-6. Resultados del monitoreo durante el primer periodo escolar 2012 (enero – marzo)

No.	Fecha	Demanda bioquímica de oxígeno [mg/L]				Demanda química de oxígeno [mg/L]				Sólidos totales [mg/L]				Sólidos suspendidos totales [mg/L]				Sólidos disueltos totales [mg/L]				pH							
		Punto A	Punto B	Punto C	Punto D	Punto A	Punto B	Punto C	Punto D	Punto A	Punto B	Punto C	Punto D	Punto A	Punto B	Punto C	Punto D	Punto A	Punto B	Punto C	Punto D	Punto A	Punto B	Punto C	Punto D				
1	23/01/2012						208	152			519	497			40	18			479	479			7.3	7.5					
2	24/01/2012						453	137			929	785			56	60			873	725			7.6	7.5					
3	26/01/2012		330	260			590	464			1089	959			154	162			935	797			7.5	7.9					
4	27/01/2012		325	246			457	337			890	990			10	112			880	878			7.5	7.4					
5	30/01/2012						522	320			919	840				110				730				7.8	8				
6	31/01/2012						610	337			1067	960			154	102			913	858			7.6	8					
7	01/02/2012		193	165			500	279			993	980			140	612			853	368			8	8.2					
8	02/02/2012		258	142			496	277			1039	1173				280				893				7.9	8				
9	03/02/2012		334	291			468	368			988	1075			260	298			728	777			8	8					
10	07/02/2012						427	461			912	1002			792	126			120	876			7.6	7.9					
11	08/02/2012						414	232			929	918			140	290			789	628			8	8.3					
12	09/02/2012		203	115			367	296			793	962			304	464			490	498			7.7	8					
13	10/02/2012		210	158			358	333			803	872			244	500			559	372			8.3	8.2					
14	13/02/2012						537	281	290	0	902	624	653	224	136	180	260		766	444	393		7.6	8.1	8.3	8.2			
15	14/02/2012						703	305	419	164	1097	839	1050	675	488	34	646	30	609	804	404	645		7.7	8.3	8.4	8.3		
16	15/02/2012	300	272	168	123	426	330	215	137	887	841	1229	697		230	58	6		611	1171	691		7.7	8	8.2	8.1			
17	16/02/2012	315	175	118	120	568	332	247	193	1017	775	836	745		58	230	30		718	605	715		7.9	8.3	8.2	8.3			
18	17/02/2012	277	285	137	123	512	455	368	214	936	906	862	848		96	352	468	112	840	554	394	736		7.7	8	8.3	8.2		
19	20/02/2012						737	408	346	235														7.3	7.5	8	8		
20	22/02/2012						594	369	226	175														7.5	8.2	8.3	8.1		
21	23/02/2012	485	207	155	188	628	471	317	227	1516	923	913	884		170	424	298		752	489	586		7.8	8	8.1	8.3			
22	24/02/2012	320	263	203	185					965	995	1027	873		208	282	462	406	757	713	565	467		7.7	7.6	8	8		
23	27/02/2012						640	246	87	471	1130	765	832	1020		716	650			413	115			7.8	8	8.4	8.3		
24	28/02/2012						542	225	116	286														7.8	7.9	8.2	8.2		
25	29/02/2012	562	162	120	115	710	204	72	72	2213	747	735	734		1732	168	246	64	482	579	489	670		7.7	8	8.3	8.2		
26	01/03/2012	147	157	108	58					1237	734	854	747		312	166	338	196	925	568	516	552		7.3	7.5	8.1	8.1		
27	02/03/2012	283	272	175	135					1225	886	1132	785		298	156	650	224	927	730	482	561		7.6	7.9	8.2	8.1		
28	05/03/2012						648	427	626	46	1391	871	1681	719		258	128	920	38	1133	743	761	681		7.5	7.6	8.2	8	
29	06/03/2012						638	532	291		1402	987	1024			932	312	976		470	674	48			7.3	7.5	8		
30	07/03/2012	320	203	102			686	486	305		1648	922.5	1054			492	124	360		1156	799	694			7.9	8.2	8.2		
31	08/03/2012	385	258	152			626	487	175		1690	1243	1165			868	360	208		822	883	957			7.5	7.7	8		
32	09/03/2012	290	282	170			516	363	494		1427	1108	1435			320	150	588		1106	958	847			7.3	7.7	8.3		
33	12/03/2012										1788	875	927			1773	76	348		14	799	579				7.4	7.5	8.3	
34	13/03/2012						973	389	149																	7.7	8	8.2	
35	14/03/2012	160	173	85			246	311	140		746	804	857			254	146	256		491	658	601			7.7	8.1	8.2		
36	15/03/2012	655	175	110			1603	312	194																	7.8	8.1	8.4	
37	16/03/2012	312	180	187			666	341	344																	7.5	7.7	8	
38	21/03/2012	195	127	145			487	206	190		882	683	754			87	80	266		795	603	488			7.3	7.5	8.1		
39	22/03/2012	202	78	68			667	345	251		1395	756	819			1000	94	240		395	662	579			7.4	7.8	8		
40	23/03/2012	393	103	13			711	526	156																	7.3	7.6	8.1	
41	26/03/2012						613	222	111																	7.4	8.2	8.4	
42	27/03/2012						767	461	247																	7.8	8.3	8.3	
Promedio		329	218	150	131	658	392	273	185	1275	883	965	746	586	200	346	140	712	677	623	630	7.54	7.76	8.03	8.15				
Remoción		SP = 34% SS = 13%				SP = 40% SS = 32%				SP = 31% SS = 23%				SP = 66% SS = 59%				SP = 5% SS = -1%											
Mín		147	78	13	58	246	204	72	0	746	519	497	224	87	10	18	6	14	115	48	467	7.3	7.3	7.4	8.0				
Máx		655	334	291	188	1603	610	626	471	2213	1243	1681	1020	1773	792	976	406	1156	958	1171	736	7.9	8.3	8.4	8.3				
Desviación Est.		136	70	61	41	238	109	122	123	373	146	218	192	525	168	236	135	307	204	224	86	-	-	-	-				

Prueba no realizada

SP.- Sedimentador Primario

CBR = Contactor Biológico Rotatorio

Punto A.- Muestra obtenida en el cárcamo de bombeo. Punto B.- Muestra obtenida en la salida del sedimentador primario (biodigestor). Punto C.- Muestra obtenida en la salida del biodisco.

Tabla V-7. Resultados del monitoreo durante el primer periodo escolar 2012

No.	Fecha	Remoción Global		
		DBO	DQO	SST
1	23/01/2012		27%	55%
2	24/01/2012		70%	-7%
3	26/01/2012	21%	21%	-5%
4	27/01/2012	24%	26%	-12%
5	30/01/2012		39%	
6	31/01/2012		45%	34%
7	01/02/2012	15%	44%	-337%
8	02/02/2012	45%	44%	
9	03/02/2012	13%	21%	-15%
10	07/02/2012		-8%	84%
11	08/02/2012		44%	-107%
12	09/02/2012	43%	19%	-53%
13	10/02/2012	25%	7%	-105%
14	13/02/2012		81%	-91%
15	14/02/2012		77%	94%
16	15/02/2012	59%	68%	97%
17	16/02/2012	62%	66%	48%
18	17/02/2012	56%	58%	77%
19	20/02/2012		68%	
20	22/02/2012		71%	
21	23/02/2012	61%	64%	-75%
22	24/02/2012	42%		-95%
23	27/02/2012		26%	9%
24	28/02/2012		47%	
25	29/02/2012	80%	90%	96%
26	01/03/2012	61%		37%
27	02/03/2012	52%		25%
28	05/03/2012		93%	85%
29	06/03/2012		54%	-5%
30	07/03/2012	68%	56%	27%
31	08/03/2012	61%	72%	76%
32	09/03/2012	41%	4%	-84%
33	12/03/2012			80%
34	13/03/2012		85%	
35	14/03/2012	47%	43%	-1%
36	15/03/2012	83%	88%	
37	16/03/2012	40%	48%	
38	21/03/2012	26%	61%	-207%
39	22/03/2012	66%	62%	76%
40	23/03/2012	97%	78%	
41	26/03/2012		82%	
42	27/03/2012		68%	

Matriz de operación

		Punto Final		
		B	C	D
Punto de origen	A			
	B			
	C			

- Prueba no realizada
- Punto A.- Muestra obtenida en el cárcamo de bombeo
- Punto B.- Muestra obtenida en la salida del sedimentador primario
- Punto C.- Muestra obtenida en la salida del biodisco
- Punto D.- Muestra obtenida en la salida del sedimentador primario

Los valores de los parámetros de calidad del efluente se encuentran por encima de los exigidos por la norma para el reúso del agua tratada (NOM-003-SEMARNAT). Sin embargo, se mejora la calidad de agua que se dispone en el suelo para su infiltración.

En la Figura V-7 se observa la representación gráfica del porcentaje de remoción logrado para cada prueba correspondiente de la Tabla V-7. Para facilitar la interpretación de resultados se colocaron dos líneas perpendiculares al eje de las abscisas que representan el límite de cada política de flujo

en la operación de la planta. Así, hasta la prueba 13 se representa sólo el rendimiento del biodisco, a partir de la prueba 14 hasta la 28 se cambió la configuración de flujo usando el sedimentador secundario como último elemento de tratamiento. A partir de la salida de operación del sedimentador secundario se maneja un flujo con tratamiento hasta el biodisco. Esto permite ser más objetivo en cuanto a la evaluación general de la planta ya que permite reconocer el estado flujo en cada prueba representada. Para lograr una visión general del funcionamiento de la planta se tomaron los valores registrados de la prueba 13 hasta la 28 y se obtuvieron los promedios correspondientes.

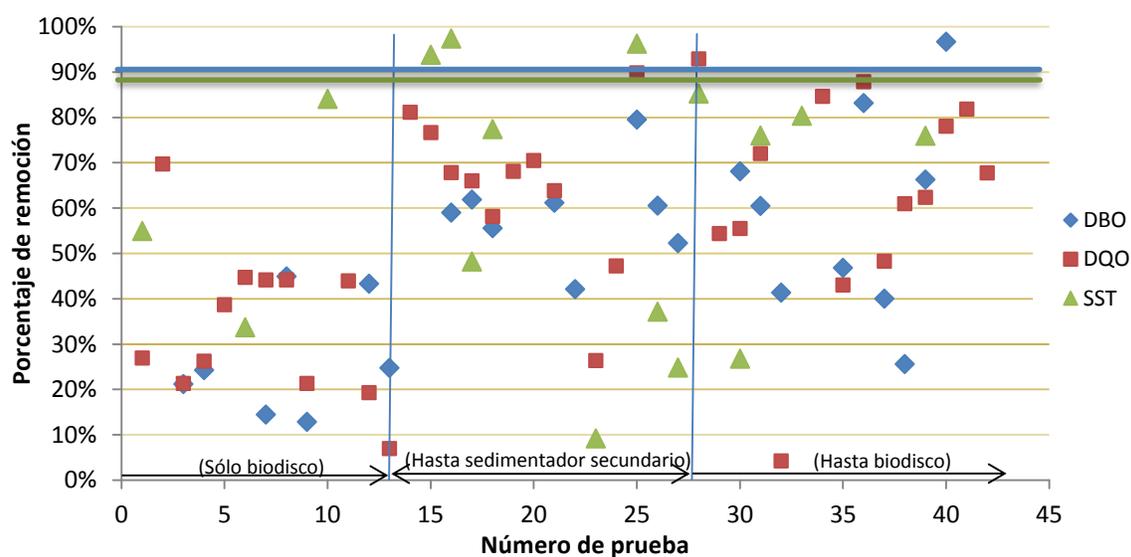


Figura V-7. Representación gráfica de los resultados del monitoreo durante el primer periodo escolar 2012

Los resultados durante estas pruebas fueron de 59% de remoción de DBO, 67% de DQO y 46% de SST, en cuanto a calidad del efluente se obtuvo un promedio de 130 mg/L de DBO, 193 mg/L de DQO y 152 mg/L de SST. De manera intrínseca está el tener en cuenta que la planta opera con un caudal variable y mayor al de diseño por lo que no se puede emitir una conclusión que descalifique el sistema de tratamiento. Las líneas horizontales representan el porcentaje de remoción esperado de todo el sistema en cuanto a DBO y SST de acuerdo a su color. Comparando los resultados del monitoreo con los calculados pudiera parecer que el sistema no es apto para este tipo de agua residual (refiriéndose a la gran dispersión de datos ya que la mayoría debería encontrarse alrededor de cada línea horizontal correspondiente). Sin embargo, este comportamiento variable se debe a que el gasto siempre fue variable, de manera que no se cuenta con las bases suficientes para descartar el buen funcionamiento del sistema.

Resultados por elemento

El análisis de cada elemento en este periodo se muestra en las últimas filas de la Tabla V-6. Sin embargo, para contrastar el funcionamiento del sistema se presentan los valores de diseño y los resultados del monitoreo en la Tabla V-8.

Tabla V-8. Valores de diseño y resultados promedio del monitoreo de cada elemento

Elemento	Parámetro	Diseño			Monitoreo		
		Entrada	Salida	Remoción	Entrada	Salida	Remoción
Sedimentador primario	DBO	284	186	35%	329	218	34%
	DQO	-	-	-	658	392	40%
	SST	272	96	65%	610	203	67%
Biodisco	DBO	186	26	86%	218	150	31%
	DQO	-	-	-	392	273	30%
	SST	96	96	0%	203	346	-
Sedimentador secundario	DBO	26	26	0%	150	131	13%
	DQO	-	-	-	273	193	29%
	SST	96	30	69%	346	140	59%

Unidades: [mg/L]

En esta tabla se destacan varios puntos: (1) las concentraciones utilizadas para los cálculos en el diseño rebasan los presentados en el monitoreo, esto se debe a que no se contaba con la instalación de una fosa séptica en el mismo terreno de construcción de la planta al momento de realizar la caracterización del agua residual; (2) el sedimentador primario fue el único elemento que funcionó de acuerdo a lo esperado al presentar la remoción calculada durante el monitoreo, de forma contraria, el sedimentador secundario presentó problemas de operación que no afectaron en gran medida los resultados del monitoreo debido a que se evitó que los flóculos de los lodos vertieran hacia la salida de este, sin embargo, esto requería de una intervención frecuente por lo que se suspendió su operación. (3) También destaca el bajo rendimiento obtenido durante el monitoreo del biodisco en cuanto a DBO (31% < 86%), lo que se atribuye principalmente a la variación del gasto y a una mayor concentración de sustrato de la esperada (218 mg/L > 186 mg/L). La calidad del efluente calculada se encuentra por debajo de los valores obtenidos en el monitoreo, en el caso de la DBO el resultado fue aproximadamente 5 veces mayor al esperado (131 mg/L > 26 mg/L) al igual que para los sólidos suspendidos totales (140 mg/L > 30 mg/L).

CONCLUSIONES

Este trabajo cumplió con el objetivo general, al presentar las etapas que llevaron hasta la operación de la planta piloto propuesta para un edificio de oficinas en CU. Además, se realizaron satisfactoriamente los objetivos específicos discutidos en el tiempo planeado.

Los valores de los parámetros de la caracterización del agua residual para el diseño de las unidades fue rebasado durante los periodos de operación de la planta. La DBO promedio de cinco días del influente en la caracterización fue de 284 mg/L. Durante los dos periodos de operación resultó en 394 y 329 mg/L respectivamente. Los SST en la caracterización fueron 272 mg/L y 680 y 586 mg/L durante la operación. La variación de resultados se debió a que durante la caracterización se ignoraba que existía una fosa séptica para el agua residual del edificio.

El censo de población y los aforos realizados antes y después de la ampliación del edificio de la División de Ingenierías Civil y Geomática muestran que existe un aumento de 1,326 a 2,170 L/d en la generación del agua residual.

Los valores promedio de DBO y SST en el influente durante el funcionamiento de todas las unidades de la planta fueron de 336 y 424 mg/L; con valores en el efluente de 131 y 152 mg/L respectivamente. Por lo tanto, la remoción total de materia orgánica como DBO es de 61% y de 64% para SST.

El funcionamiento del biodigestor cumplió con las expectativas esperadas en cuanto a la remoción de sólidos sedimentables y de materia orgánica con el objetivo de mejorar las características del agua residual a la entrada del biodisco. Los resultados obtenidos en el segundo periodo escolar 2011 muestran un promedio de remoción de materia orgánica como DBO de 44% y de SST de 63%, durante el primer periodo escolar 2012 fueron de 34% y 66% respectivamente.

La unidad de CBR presenta remociones de materia orgánica como DBO de 35% en el segundo periodo escolar 2011 y de 31% durante el primer ciclo escolar 2012. En el diseño se manejó una remoción del 86%, la principal causa de esta diferencia es consecuencia de la falla de operación por taponamiento de la válvula principal. Los ajustes realizados durante los periodos de operación redujeron la carga orgánica suministrada al biodisco de 57.9 a 28.9 gDBO/d·m², ambas superiores a los 13.8 gDBO/d·m² correspondiente a la carga orgánica de diseño.

El sedimentador secundario presentó remociones de SST del 59% y de materia orgánica como DBO del 13%.

Se realizó una microscopía electrónica de barrido con la biopelícula del CBR obteniendo un total de 66 micrografías y la caracterización de los microorganismos con base en su forma y tamaño. Se identificaron bacterias de forma bacilar, cocoide, espirila, vibrios, filamentosas, además de hongos y algunos protozoos e insectos.

Se realizaron pruebas de huevos de helminto en el influente y efluente del biodisco utilizando la norma mexicana NMX AA-113-SCFI-1999 en los que se obtuvo la ausencia de estos microorganismos en el agua residual (0 HH/L).

BIBLIOGRAFÍA

- Alleman, J. E. (1982). The history of fixed-film wastewater treatment systems. *I International Conference on Fixed-Film Biological Processes*. King Island, Ohio.
- Alleman, J. E., Veil, J. A. & Canaday, J. T. (1982). Scanning electron microscope evaluation of rotating biological contactor biofilm. *Water Res.* 16, 543-550.
- Antonie, R. L. (1976). *Fixed biological surfaces wastewater treatment*. Ohio: CRC Press.
- Association American Public Health. (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Ed.* Washington.
- Autotrol Corporation. (1978). *Autotrol wastewater treatment systems design manual*. Milwaukee, Wisconsin: Autotrol Corporation.
- Benefield, L. & Randall, C. W. (1980). *Biological process design for wastewater treatment*. EUA: Prentice Hall.
- Bitton, G. (2011). *Wastewater Microbiology 4rd ed.* Department of Environmental Engineering Sciences University of Florida, Gainesville, Florida: John Wiley & Sons.
- Brenner, R. C., Heidman, J. A., Opatken, E. J. & Petrasek, A. (1984). *Design information on rotating biological contactors*. Cincinnati, Ohio: U.S. Environmental Protection Agency.
- Colegio de Ingenieros Ambientales de México A.C. (2007). *Evaluación del biodigestor autolimpiable BDA-1300*. México.
- Comisión Nacional del Agua. (2009). *Ley Federal de Derechos: Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales*. México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua. (2009). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Alcantarillado sanitario*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua. (2004). *Sistemas alternativos de tratamiento de aguas residuales y lodos producidos. Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. México: SEMARNAT.
- Comisión Nacional del Agua. (2009). *Inventario nacional de plantas de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación*. México, D.F.: SEMARNAT.
- Comisión Nacional del Agua. (2010). *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación*. México, D.F.: SEMARNAT.
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Colombia: McGraw Hill.

- Curds, C. R., & Cockburn, A. (1970). *Protozoa in biological sewage-treatment processes-i. a survey of the protozoan fauna of british percolating filters and activated-sludge plants*. Water Research 4.
- Dilim, K. M., & Neelima, R. (2004). *Environmental biotechnology*. India: Sarasgraphics.
- Doman, J. (1929). Results of Operation of Experimental Contactor Filter with Partially Submerged Rotating Plates. *Sewage Works Journal*.
- Glynn, H., & Gary, H. (1999). *Ingeniería Ambiental*. Prentice.
- González-Martínez, S. & Elías-Castro, J. G. (1990). *Diseño de biodiscos*. México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Grady, C. P., Jr., G. T., & Lim, H. D. (1999). *Biological Wastewater Treatment 2nd ed*. New York: Marcel Dekker.
- Gray, N. F. (1989). *Biology of Wastewater Treatment*. Oxford University Press.
- Guzmán, J. D. (2010). Diagnóstico y sectorización del sistema de agua potable de Ciudad Universitaria de la UNAM. PUMAGUA. D.F., México: Tesis, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Harremoes, P. (1978). *Biofilm Kinetics: In Water Pollution Microbiology vol II*. New York: John Wiley and Sons.
- Henze, M., Harremoës, P., & Arvin, E. (2002). *Wastewater Treatment: biological and chemical processes 3rd ed*. Germany: Springer.
- Hitdlebaugh, J., & Miller, R. (1981). Operational problems with rotating biological contactors. *Water Pollution Control Fed.* 53, 1283 - 1293.
- Hull, M., Klimiuk, E., & Janczukowicz, W. (1991). Comparative studies of activated sludge and rotating biological disc process. *45th Purdue Industrial Wastes Conference Proceedings* (pp. 339 - 346). Lewis Publishers Inc.
- IMTA, S. d. (Director). (1996). *Plantas de tratamiento: El sistema de biodiscos* [Motion Picture].
- Jiménez C., B. E. (2001). *La Contaminación Ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. México: LIMUSA.
- Kinner, N. E., & Curds, C. R. (1989). Development of protozoan and metazoan communities in rotating biological contactor biofilms. *Water Res.* 23, 481-490.
- Lasa, I. (2006). Towards the identification of the common features of bacterial biofilm development. *International Microbiology* (pp. 21-28). Pamplona, España: Public University of Navarra-CSIC.

- Lee, N., & Welander, T. (1994). Influence of predators on nitrification in aerobic biofilm processes. *Water Science and Technology* 29(7), 355 - 363.
- López Ruiz, R. (2003). *Aguas residuales municipales y biosólidos. Elementos básicos, caracterización, tratamiento, reusos*. México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Mara, D., & Horan, N. (2003). *Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. School of Civil Engineering University of Leeds, UK: Academic Press.
- Martínez, Sergio A., & Rodríguez, Miriam G. (2005). *Tratamiento de aguas residuales con MATLAB*. México: REVERTE, S.A.
- Metcalf & Eddy. (2004). *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*. McGraw Hill Companies.
- Pano, A., & Middlebrooks, J. E. (1983). Kinetics of Carbon and Ammonia Nitrogen Removal in RBCs. *Journal Water Pollution Control Federation*, vol. 55, 956.
- Programa de manejo, uso y reuso del agua en la UNAM. (2008). *Diagnóstico, PUMAGUA*. México, D.F.: UNAM.
- Ramalho, R. S. (1993). *Tratamiento de aguas residuales*. Faculty of Science and Engineering Laval University, Quebec, Canadá: Reverté.
- Romero, J., Sánchez, J., Welter, A., Ascar, G., & Grumelli, Y. (2004). Modelos matemáticos para biodiscos. *AIDIS Argentina. Desafíos ambientales y del saneamiento en el siglo XXI* (pp. 1-20). Buenos Aires, Argentina: Universidad Católica de Córdoba, Facultad de Ingeniería.
- Rouf, M. A., & Stokes, J. (1962). Isolation and identification of the sudanophilic granules of *Sphaerotilus natans*. *Bacteriology* 83, 343-347.
- SEMARNAT. (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. *Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*. México: Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT. (1998). Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. *Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas se reúsen en servicios al público*. México: Diario Oficial de la Federación.
- 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*. México: Diario Oficial de la Federación.
- Seoáñez, C. Mariano (2004). *Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo*. España: Mundi-Prensa.

- Solorio, P. F. (1988). *Tratamiento de agua de remojo de la cebada por medio de biodisco*. México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Taicheong, Chan R., & Stenstrom, M. K. (1979). *Use of the Rotating Biological Contactor for Appropriate Technology Wastewater Treatment*. School of Engineering and Applied Science University of California, Los Angeles: Water Resources Program
- Tait, S. J., & Freidman, A. A. (1980). Anaerobic rotating biological contactor for carbonaceous wastewaters. *Journal of the Wather Pollution Control Federation*, 2257-2269.
- Tortora, G. J. (2007). *Introducción a la microbiología*. Buenos Aires: Médica Panamericana.
- Trulear, M. G., & Characklis, W. G. (1982). Dynamics of the biofilm processes. *Journal of the Water Pollution Control Federation*.
- U.S. EPA. (1985). Review of Current RBC Performance and Design Procedures. *EPA/600/2-84/106*.
- Valdez, E. C., & Vázquez, A. G. (2003). *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*. México: Fundación ICA.
- Védry, B. (1996). *Les Biomasses Épuratrices*. Paris, Francia: Agence de l'Eau Seine-Normandie.
- Von Sperling, Marcos (2007). *Activated Sludge and Aerobic Biofilm Reactors*. Londres, UK: IWA Publishing.
- Water Enviromental Federation & American Society of Civil Engineers. (1992). *Design og municipal Wastewater Treatment Plants*. Brattleboro, Vermont: Book Press, Inc.
- Water Environment Federation (2000). *Aerobic Fixed-Growth Reactors. Special Publication*.
- Water Environment Federation (1998). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*. Manual of Practice No. 8, 4th ed.; Water Environment Federation: Alexandria, Virginia.
- Water Environmental Federation & American Society of Civil Engineers (1992). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*; Book press Inc., Brattleboro, Vermont
- Weismann, U., Su In, C., & Dombrowski, E.-M. (2007). *Fundamentals of Biological Wastewater Treatment*. Alemania: WILEY-VCH.
- Wingender, J., & Flemming, H. (1999). *Autoaggregation of microorganisms: flocs and biofilms*. In J. Winter (ed), *Biotechnology 2nd ed*. Wiley-VCH, Weinheim, Germany.

ANEXO I**Aforo y muestreo del agua residual generada por la División de Ingenierías Civil y Geomática (DICyG)****Objetivo:**

Conocer el caudal promedio diario de aguas residuales generadas por la DICyG y obtener muestras para su análisis en laboratorio.

Introducción

La DICyG se encuentra en la zona sureste del campus central de Ciudad Universitaria, algunos edificios dentro de esta zona no cuentan con conexión al sistema de alcantarillado del campus, siendo este edificio uno de ellos. La descarga de las aguas residuales de este edificio se lleva a cabo en una grieta localizada entre el circuito interior de CU y la fachada trasera de la DICyG (ver Figura A1-1).



Figura A1-1. Localización del punto de descarga de aguas residuales de la DICyG

La descarga del edificio no es continua, lo que dificulta la cuantificación del caudal por medios de medición continua, además de esto, la tubería no tiene ningún tipo de mantenimiento y presenta azolves en su trayectoria que son difíciles de identificar y resolver.

La conducción del agua residual presenta un cambio de dirección en la parte exterior del edificio (Figura A1-2) donde existe depósito de sólidos. Al final de la tubería se muestran dos tubos de descarga adicionales, cuya procedencia se desconoce, sin embargo, no afectan la cuantificación del caudal.



Figura A1-2. Punto de descarga de aguas residuales de la DICyG

Metodología

El tiempo de medición de caudal fue de cinco días, del 8 al 12 de noviembre de 2010, y se llevó a cabo de 7 am a 8 pm con la colaboración de estudiantes de la Facultad de Ingeniería, como parte de su servicio social.

Como se mencionó en la sección anterior, el gasto no puede ser cuantificado por medios de medición continua, como vertedores, debido a su comportamiento intermitente. El espacio en el registro de descarga es de aproximadamente 50 cm de ancho por 70cm de largo (ver figura A1-2) y aproximadamente 4.5 m de profundidad.

El aforo se llevó a cabo introduciendo una cubeta de 10 litros de capacidad, dicho recipiente cuenta con un tornillo fijado en su parte inferior del cual se sujeta una de las dos cuerdas que servirán para el vaciado rápido, la segunda de estas está atada al mango de sujeción y, a su vez, a un tubo galvanizado transversal exterior apoyado en dos bases del mismo material (ver figura A1-3). El registro se muestra en la tabla A1-2.



Figura A1-3. Mecanismo de aforo y muestreo

Para la integración de la muestra compuesta se obtuvieron muestras simples de 600 ml en intervalos de una hora aproximadamente y se conservaron a bajas temperaturas en un aislante térmico (hielera) por no más de 4 horas, posteriormente se llevaron a refrigeración en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental ubicado en el edificio de la Secretaría de Posgrado e Investigación. Al término de la jornada se prepararon las muestras compuestas para su análisis al día siguiente.

Resultados

Los resultados obtenidos del aforo y muestreo se encuentran detallados en las tablas de registro. En ellas se destaca el caudal medido en el intervalo de tiempo considerado, al igual que el comportamiento horario de la descarga.

Se llegó a determinar que el valor máximo de caudal de descarga por día es de aproximadamente $1.72 \text{ m}^3/\text{d}$ aplicando un factor de seguridad del 30% que implica las descargas fuera del intervalo de tiempo de medición u otro error implicado en su determinación. La figura A1-4 muestra la curva de descargas de los días aforados, donde se nota que las de mayor valor se presentan entre las 12:00 y 15:00 horas, además, se observa que el comportamiento de las curvas no es muy similar. Esto puede ser consecuencia de los azolves a lo largo de la tubería, que afectan al flujo de las aguas residuales como se constata en las observaciones registradas el lunes y el viernes.

Caracterización del agua residual de la DICyG

Tabla A1-2. Determinación del volumen total y obtención de muestras simples en el punto de descarga

Fecha: 08/11/2010

Nombre	Hora	No. de cubetas vaciadas	Hora de muestra	ID muestra	T [°C]	Volumen [l]	%Vol	ml de muestra	Observaciones
Luis A. Mata	07:00 - 08:00	18	07:45	08_1	14	180	11,04	442	Entre las 7 y 8 am se presentó una descarga extraordinaria de alrededor 120 litros. Esto se debió probablemente a la acumulación de agua residual y taponamiento del tubo de concreto en el cambio de dirección (albañal), una vez vencida la fuerza de fricción del material obstructivo la descarga fué rápida (2.5 min aproximadamente)
"	08:00 - 09:00	8	08:40	08_2	14	80	4,91	196	
"	09:00 - 10:00	11	09:45	08_3	14	110	6,75	270	
Alexis	10:00 - 11:00	17	10:50	08_4	15	170	10,43	417	
"	11:00 - 12:00	11	11:43	08_5	15	110	6,75	270	
"	12:00 - 13:00	13	12:54	08_6	16	130	7,98	319	
"	13:00 - 14:00	15	13:47	08_7	16	150	9,20	368	
Luis A. Mata	14:00 - 15:00	19	14:50	08_8	17	190	11,66	466	
"	15:00 - 16:00	11	15:48	08_9	17	110	6,75	270	
"	16:00 - 17:00	6	16:40	08_10	17	60	3,68	147	
Diego	17:00 - 18:00	9	17:45	08_11	17	90	5,52	221	
"	18:00 - 19:00	13	18:42	08_12	15	130	7,98	319	
Luis A. Mata	19:00 - 20:00	12	19:38	08_13	15	120	7,36	294	
Total		163			Total	1630	100,00	4000,00	

Fecha: 09/11/2010

Nombre	Hora	No. de cubetas vaciadas	Hora de obtención de muestra	ID muestra	T [°C]	Volumen [l]	%Vol	ml de muestra	Observaciones
Eder Villaseñor	07:00 - 08:00	13	07:40	08_13	14	130	9,56	382	
"	08:00 - 09:00	10	08:38	08_5	14	100	7,35	294	
Alexis	09:00 - 10:00	5	09:54	08_8	15	50	3,68	147	
"	10:00 - 11:00	11	10:31	08_11	15	110	8,09	324	
"	11:00 - 12:00	20	11:38	08_6	15	200	14,71	588	
"	12:00 - 13:00	8	12:40	08_1	16	80	5,88	235	
Luis A. Mata	13:00 - 14:00	10	13:38	08_2	16	100	7,35	294	
"	14:00 - 15:00	14	14:45	08_12	16	140	10,29	412	
"	15:00 - 16:00	6	15:37	08_4	17	60	4,41	176	
Raúl	16:00 - 17:00	15	16:39	08_3	16	150	11,03	441	
"	17:00 - 18:00	8	17:42	08_7	16	80	5,88	235	
"	18:00 - 19:00	9	18:36	08_9	15	90	6,62	265	
"	19:00 - 20:00	7	19:46	08_10	15	70	5,15	206	
Total		136			Total	1360	100,00	4000,00	

Caracterización del agua residual de la DICyG

Tabla A1-2. Determinación del volumen total y obtención de muestras simples en el punto de descarga (continuación)

Fecha: 10/11/2010

Nombre	Hora	No. de cubetas vaciadas	Hora de obtención de muestra	ID muestra	T [°C]	Volumen [l]	%Vol	ml de muestra	Observaciones
Luis A. Mata	07:00 - 08:00	7	07:45	08_6	15	70	6,80	272	Se observó formación de espuma y olor a detergente entre las 8 y 10 am de los días lunes 08 y miércoles 10
"	08:00 - 09:00	5	08:40	08_8	15	50	4,85	194	
"	09:00 - 10:00	10	09:42	08_3	15	100	9,71	388	
Alexis	10:00 - 11:00	14	10:45	08_1	15	140	13,59	544	
"	11:00 - 12:00	9	11:40	08_4	15	90	8,74	350	
"	12:00 - 13:00	9	12:50	08_9	16	90	8,74	350	
"	13:00 - 14:00	12	13:44	08_12	16	120	11,65	466	
Luis A. Mata	14:00 - 15:00	12	14:56	08_13	16	120	11,65	466	
"	15:00 - 16:00	8	15:47	08_7	17	80	7,77	311	
"	16:00 - 17:00	6	16:44	08_10	17	60	5,83	233	
"	17:00 - 18:00	4	17:30	08_11	17	40	3,88	155	
"	18:00 - 19:00	3	18:38	08_2	16	30	2,91	117	
"	19:00 - 20:00	4	19:41	08_5	16	40	3,88	155	
Total		103			Total	1030	100,00	4000,00	

Fecha: 11/11/2010

Nombre	Hora	No. de cubetas vaciadas	Hora de obtención de muestra	ID muestra	T [°C]	Volumen [l]	%Vol	ml de muestra	Observaciones	
Eder Villaseñor	07:00 - 08:00	9	07:45	08_2	15	90	7,56	303		
"	08:00 - 09:00	16	08:37	08_12	15	160	13,45	538		
Jorge H. Acosta	09:00 - 10:00	10	09:37	08_9	16	100	8,40	336		
"	10:00 - 11:00	11	10:37	08_7	16	110	9,24	370		
"	11:00 - 12:00	12	11:43	08_13	17	120	10,08	403		
"	12:00 - 13:00	8	12:50	08_4	17	80	6,72	269		
Rodrigo E. Alva	13:00 - 14:00	7	13:45	08_3	18	70	5,88	235		
"	14:00 - 15:00	16	14:45	08_6	18	160	13,45	538		
"	15:00 - 16:00	10	15:50	08_8	17	100	8,40	336		
Raúl	16:00 - 17:00	7	16:39	14	17	70	5,88	235		
"	17:00 - 18:00	3	17:45	08_20	17	30	2,52	101		
"	18:00 - 19:00	6	18:48	08_11	16	60	5,04	202		
"	19:00 - 20:00	4	19:40	08_1	16	40	3,36	134		
Total		119			Total	1190	100,00	4000,00		

Tabla A1-2. Determinación del volumen total y obtención de muestras simples en el punto de descarga (continuación)

Fecha: 12/11/2010

Nombre	Hora	No. de cubetas vaciadas	Hora de obtención de muestra	ID muestra	T [°C]	Volumen [l]	%Vol	ml de muestra	Observaciones
Luis A. Mata	07:00 - 08:00	14	07:42	14	15	140	9.86	394	Se presentó el mismo fenómeno del día lunes 08 alrededor de las 7:50 am, pero con menor intensidad
"	08:00 - 09:00	5	08:44	C1	15	50	3.52	141	
"	09:00 - 10:00	9	09:41	C2	15	90	6.34	254	
Raúl	10:00 - 11:00	8	10:52	1	15	80	5.63	225	
"	11:00 - 12:00	10	11:45	2	16	100	7.04	282	
"	12:00 - 13:00	21	12:38	08_11	16	210	14.79	592	
"	13:00 - 14:00	21	13:40	08_7	16	210	14.79	592	
Alexis	14:00 - 15:00	7	14:36	08_10	17	70	4.93	197	
"	15:00 - 16:00	10	15:39	08_3	17	100	7.04	282	
"	16:00 - 17:00	5	16:45	08_9	17	50	3.52	141	
"	17:00 - 18:00	18	17:42	08_13	17	180	12.68	507	
Luis A. Mata	18:00 - 19:00	6	18:45	08_8	16	60	4.23	169	
"	19:00 - 20:00	8	19:35	08_6	16	80	5.63	225	
Total		142			Total	1420	100.00	4000.00	

Gasto [L/h]

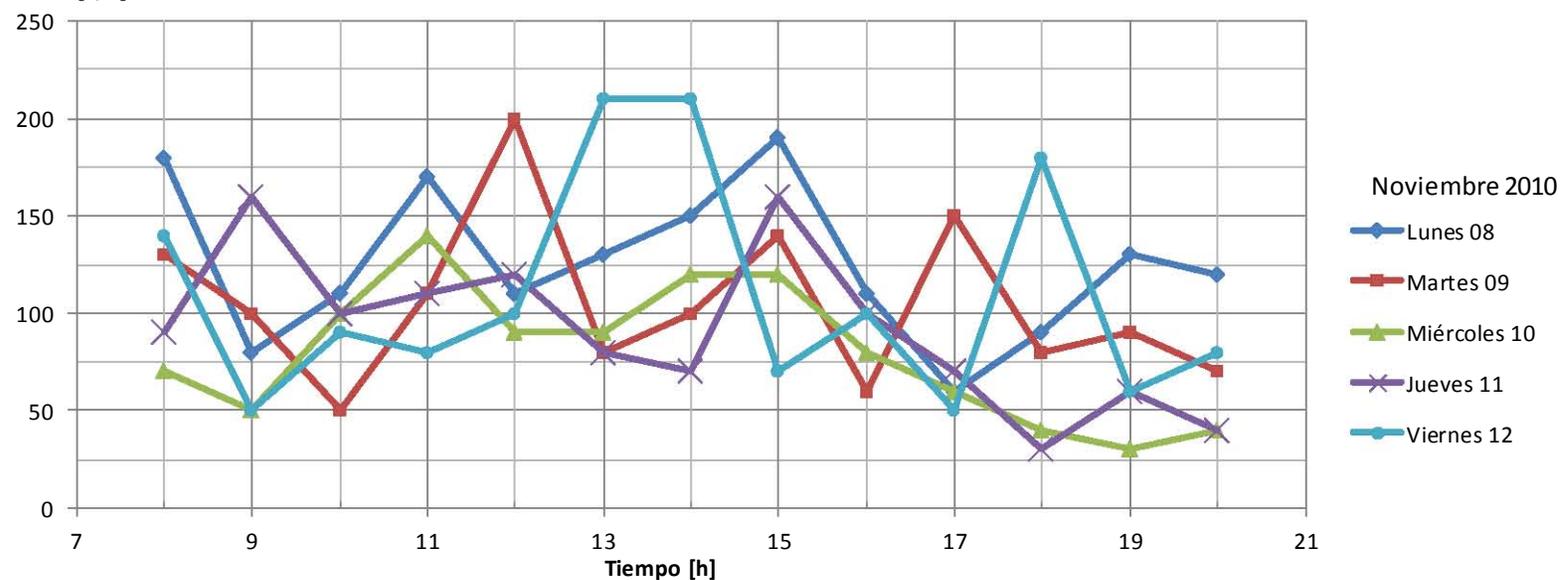


Figura A1-4. Curva de descarga horaria de las aguas residuales generadas por la DICyG

La Figura A1-5 presenta el promedio lineal y el promedio horario durante el aforo realizado. En ésta se observa que la mayor generación se presenta entre las 14:00 y 16:00 horas. También se constata que la generación del turno vespertino es menor que el matutino.

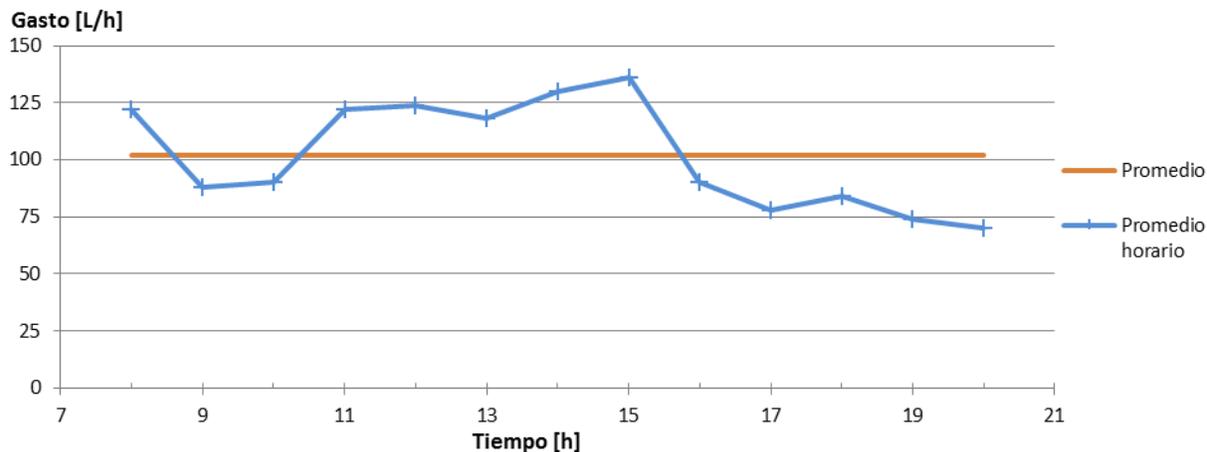


Figura A1-5. Promedio lineal y promedio horario durante el aforo

En la Figura A1-6 se presentan las curvas masa del aforo, en ésta se puede observar que los días de mayor generación corresponden a los lunes y viernes, así como la generación de agua residual total en cada día.

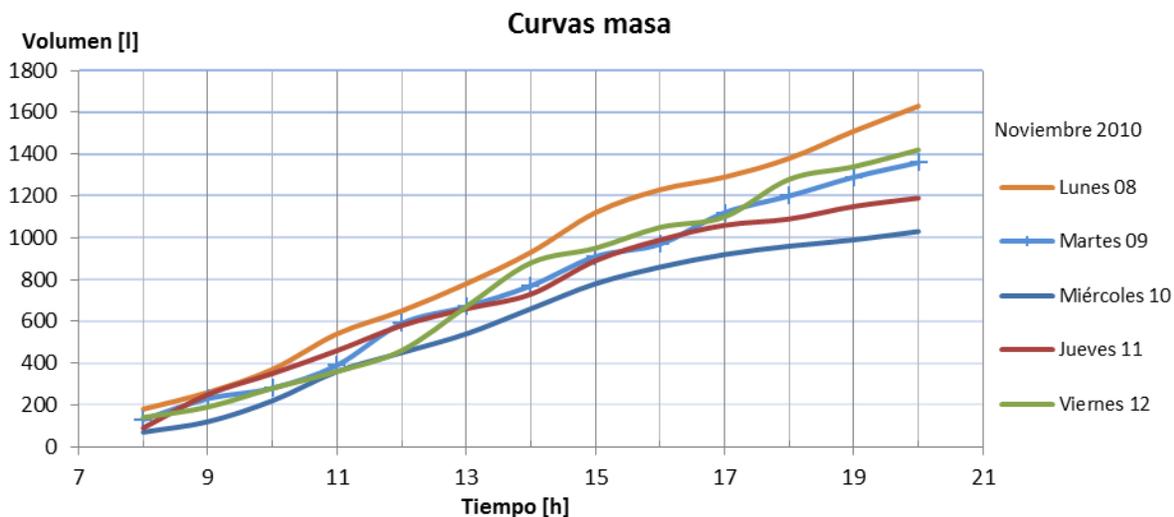


Figura A1-6. Curvas masa correspondientes a la semana de aforo

ANEXO II

Caracterización del agua residual generada por la División de Ingenierías Civil y Geomática (DICyG)

Objetivo:

Conocer las características del agua residual generada por la DICyG. Los parámetros a determinar son DBO₅, SST, SSD, Temperatura y pH principalmente.

Introducción

Las aguas residuales presentan características físicas, químicas y biológicas distintas sobre los demás tipos de agua, su determinación y análisis es necesario para optimizar el tratamiento y disposición final, a fin de minimizar los efectos adversos en los cuerpos receptores. En general se consideran como aguas residuales domésticas a los líquidos provenientes de las viviendas o residencias, edificios comerciales e institucionales. Se denominan aguas residuales municipales, a los residuos líquidos transportados por el alcantarillado de una ciudad o población. Y se llaman aguas residuales industriales, a las provenientes de las descargas de industrias de manufactura.

La caracterización de aguas residuales implica un programa de muestreo apropiado para asegurar representatividad de la muestra y un análisis de laboratorio de conformidad con las normas estándar que aseguren precisión y exactitud en los resultados.

Metodología

Para la determinación de la DBO₅ se utilizó el método 5120 B del Standard Methods (Dicromato de potasio).

De igual manera para los SST y SSD se usó la norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001.

La temperatura y el pH se obtuvieron por medio de los instrumentos correspondientes con los que se cuenta en el laboratorio.

Los resultados están registrados en la Tabla A2-3.

Trabajo de laboratorio

Demanda Bioquímica de Oxígeno

Se realizaron las pruebas correspondientes de los parámetros considerados en el objetivo. Sin embargo, la lectura de las pruebas de DBO_5 realizadas el día 16 de noviembre y que corresponden a las muestras de los días 8 y 9 se ajustaron por métodos analíticos, usando la fórmula (A2-1) con una constante de degradación de 0.23, obtenida, en principio, del promedio de los valores presentados en la tabla A2-1. En trabajos posteriores este parámetro se obtuvo con el método de diferencias logarítmicas que se describe en la literatura (3). Se realizaron dos pruebas homólogas para promediar resultados, mismos que aparecen en la tabla A2-3.

Tabla A2-1. Valores típicos de la constante de reacción de la DBO

Muestra	K (20°C) [día ⁻¹]
Agua residual cruda	0.15 – 0.30
Agua residual bien tratada	0.05 – 0.10
Agua de un río contaminado	0.05 – 0.10

Adaptada de: Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales, 2003

En la tabla A2-3 se puede observar que la dilución a 5% del agua residual indica que el oxígeno disuelto fue consumido totalmente, por lo que no se toma en cuenta para el promedio de la DBO_5 . Esto debe considerarse para futuros análisis.

Fórmulas empleadas:

$$DBO_t = L_0(1 - e^{-kt}) \quad \dots \quad (A2-1)$$

donde:

t = tiempo, días

k = constante de degradación, día⁻¹

L_0 = demanda bioquímica última, mg/L

Sólidos Suspendidos

La determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Sólidos Suspendidos Disueltos (SSD) se llevó a cabo sin contratiempos, los respectivos valores se presentan en la Tabla A2-3. Las ecuaciones utilizadas para su cuantificación son las siguientes:

$$ST = \frac{W_{fcrisol} - W_{icrisol}}{V} \dots (A1 - 2)$$

donde:

ST = Sólidos Totales, mg/L

$W_{icrisol}$ = Peso del crisol a peso constante sin muestra, mg

$W_{fcrisol}$ = Peso del crisol después de la evaporación completa de la muestra, mg

V = Volumen de muestra, L

$$SST = \frac{W_{fgooch} - W_{igooch}}{V * D} \dots (A1 - 3)$$

donde:

SST = Sólidos Suspendidos Totales, mg/L

W_{igooch} = Peso del recipiente gooch a peso constante con filtro, mg

W_{fgooch} = Peso del recipiente gooch después de la filtración completa de la muestra, mg

V = Volumen de muestra, L

D = Porcentaje de dilución, %/100

Resultados

Tabla A2-2. Valores promedio

Parámetro	Promedio	Unidades
DBO ₅	284	mg/L
ST	896,1	mg/L
SST	272	mg/L
SSD	624,1	mg/L

La temperatura del agua osciló entre los 14 y 18 °C y el pH se encuentra entre 6.1 y 8.2.

Conclusiones

Como puede observarse en la tabla A2-2 los valores promedio de los parámetros cuantificados hacen referencia a un agua residual de concentración media. Sin embargo, se deben verificar los valores de la constante de degradación utilizada para el cálculo de la DBO₅. En cuanto al pH y la temperatura no se muestran variaciones altas y se encuentran en un rango de valores apropiados para un tratamiento biológico con biodiscos. (Metcalf & Eddy, 2004).

Caracterización del Agua Residual de la DICyG

Tabla A2-3. Resumen de resultados de las pruebas de laboratorio en el punto de descarga

Fecha de muestra: 08/11/2010

Parámetro	Resultados				DBO ₅ [mg/L]	Cálculos	
	OD ₀ [mg/L]		OD ₅ [mg/L]			Promedio	k = 0.23
DBO ₅	Fecha: 09/11/2010		Fecha: 16/11/2010		520		
	% dilución	Lectura	Lectura	ΔOD [mg/L]			
	0.5	7.3	5.0	460.0	325		
			4.4	580.0			
	1.0	7.2	3.4	380.0	-		
			4.5	270.0			
5.0	7.2	0.0	-	-			
		0.0	-				
Sólidos	Totales		<u>760</u> mg/L		Vol = 50 ml Vol = 20 ml		
	Suspendidos Tot		<u>180</u> mg/L		W _{igooch} = 0.2439 g W _{icrisol} = 52.6949 g		
	Suspendidos Dis		<u>580</u> mg/L		W _{igooch} = 0.2457 g W _{icrisol} = 52.7101 g %Dil = 20 % STT = 760 mg/L SST = 180 mg/L		

Fecha de muestra: 09/11/2010

Parámetro	Resultados				DBO ₅ [mg/L]	Cálculos	
	OD ₀ [mg/L]		OD ₅ [mg/L]			Promedio	k = 0.23
DBO ₅	Fecha: 10/11/2010		Fecha: 16/11/2010		320		
	% dilución	Lectura	Lectura	ΔOD [mg/L]			
	0.5	6.9	5.4	300.0	275		
			5.2	340.0			
	1.0	6.8	3.9	290.0	-		
			4.2	260.0			
5.0	6.8	0.0	-	-			
		0.0	-				
Sólidos	Totales		<u>831</u> mg/L		Vol = 50 ml Vol = 20 ml		
	Suspendidos Tot		<u>280</u> mg/L		W _{igooch} = 0.2647 g W _{icrisol} = 44.0766 g		
	Suspendidos Dis		<u>551</u> mg/L		W _{igooch} = 0.2675 g W _{icrisol} = 44.0933 g %Dil = 20 % STT = 831 mg/L SST = 280 mg/L		

Caracterización del Agua Residual de la DICyG

Tabla A2-3. Resumen de resultados de las pruebas de laboratorio en el punto de descarga (continuación)

Fecha de muestra: 10/11/2010

Parámetro	Resultados				Cálculos	
DBO ₅	OD ₀ [mg/L]		OD ₅ [mg/L]		Promedio DBO₅ = 368 mg/L	
	Fecha: 11/11/2010		Fecha: 16/11/2010			
	% dilución	Lectura	Lectura	ΔOD [mg/L]		
	0.5	6.9	5.1	360.0		340
			5.3	320.0		
	1.0	6.9	2.8	400.0		395
2.9			390.0			
5.0	6.9	0.0	-	-		
		0.0	-			
Sólidos	Totales <u>1124.5</u> mg/L Suspendidos Tot <u>330</u> mg/L Suspendidos Dis <u>794.5</u> mg/L				Vol = 50 ml Vol = 20 ml W _{igooch} = 0.2579 g W _{icrisol} = 44.8982 g W _{fgooch} = 0.2612 g W _{fcrisol} = 44.9207 g %Dil = 20 % STT = 1124.5 mg/L SST = 330 mg/L	

Fecha de muestra: 11/11/2010

Parámetro	Resultados				Cálculos	
DBO ₅	OD ₀ [mg/L]		OD ₅ [mg/L]		Promedio DBO₅ = 180 mg/L	
	Fecha: 12/11/2010		Fecha: 17/11/2010			
	% dilución	Lectura	Lectura	ΔOD [mg/L]		
	0.5	6.4	5.9	100.0		110
			5.8	120.0		
	1.0	6.4	4.4	240.0		250
4.2			260.0			
5.0	6.3	0.0	-	-		
		0.0	-			
Sólidos	Totales <u>895</u> mg/L Suspendidos Tot <u>300</u> mg/L Suspendidos Dis <u>595</u> mg/L				Vol = 50 ml Vol = 20 ml W _{igooch} = 0.2391 g W _{icrisol} = 69.4959 g W _{fgooch} = 0.2421 g W _{fcrisol} = 69.5138 g %Dil = 20 % STT = 895 mg/L SST = 300 mg/L	

Caracterización del Agua Residual de la DICyG

Tabla A2-3. Resumen de resultados de las pruebas de laboratorio en el punto de descarga (continuación)

Fecha de muestra: 12/11/2010

Parámetro	Resultados				Cálculos	
	OD ₀ [mg/L]		OD ₅ [mg/L]			
DBO ₅	Fecha:	13/11/2010	Fecha:	18/11/2010	Promedio DBO₅ = 240 mg/L	
	% dilución	Lectura	Lectura	ΔOD [mg/L]		
	0.5	5.7	4.9	160.0		150
			5.0	140.0		
	1.0	6.4	3.3	350.0		330
			3.7	310.0		
5.0	6.3	-	-	-		
		-	-			
Sólidos	Totales		870 mg/L		Vol = 50 ml	
	Suspendidos Tot		270 mg/L		Vol = 20 ml	
	Suspendidos Dis		600 mg/L		W _{igooch} = 0.2524 g	
					W _{icrisol} = 53.5915 g	
					W _{igooch} = 0.2551 g	
					W _{icrisol} = 53.6089 g	
					%Dil = 20 %	
					STT = 870 mg/L	
					SST = 270 mg/L	

Valores promedio

Parámetro	Promedio	Unidades
DBO ₅	284	mg/L
ST	896.1	mg/L
SST	272	mg/L
SSD	624.1	mg/L

ANEXO III

Censo de población de la División de Ingenierías Civil y Geomática

Objetivo

Estimar la cantidad de agua residual que se genera en la DICyG de manera cualitativa y realizar la comparación con los aforos realizados anteriormente hasta llegar a una conclusión final tomando en cuenta los resultados de cada una de estas actividades.

Introducción

El censo es una de las operaciones estadísticas que no trabaja sobre una muestra, enfocándose en la población total. Es una herramienta útil en la ingeniería debido a los diversos usos en los que se involucra con otro tipo de datos informativos o colectados. Así, un censo de población permite, mediante ecuaciones sencillas e información estadística, determinar el posible consumo de agua que demanda dicha población, de tal manera que también cabe la posibilidad de calcular la cantidad de agua que descarga la misma en función de su uso. Estas operaciones son comunes para los cálculos en el diseño de sistemas de abastecimiento de agua potable y alcantarillado donde se considera de vital importancia la veracidad en esta actividad.

En este caso en particular la población total que labora en el edificio presenta variaciones con respecto al tiempo por las actividades académicas que desempeñan la mayoría de ellos presentando mayor número de ocupantes en el turno matutino (8:00 a 15:00). También es importante mencionar que el acceso a los sanitarios en el edificio se encuentra restringido para el personal ajeno al mismo. Además, en el edificio se cuenta con dos salas de cómputo, un auditorio de usos múltiples y el laboratorio de Geomática los cuales ocupan espacio, pero no generan agua residual en proporción al mismo.

Metodología

El censo se realizó entre los días 20 de febrero y 2 de marzo del 2012, obteniendo una población total de 60 personas en el edificio, la mayoría con actividades académicas y determinado por la hora de máxima actividad de personal en el edificio. Además de obtener el número total de personal laboral en el edificio se determinó el horario de ocupación con el fin de encontrar su relación con el comportamiento de las curvas de descarga obtenidas anteriormente. Se realizó por

medio de un formulario que se hizo llegar a cada cubículo, al mismo tiempo se colocó un aviso con los objetivos del censo. En este formulario se determinó el número de ocupantes del cubículo, días laborales y horario en el que se encuentran en las instalaciones de la DICyG. Aproximadamente el 95% de los encuestados marcaron como días laborales de lunes a viernes, el resto sólo martes y jueves, sin embargo, debido al bajo porcentaje que representan éstos últimos se decidió considerar su horario de lunes a viernes.

La Tabla A3-1 muestra el comportamiento de la población en el edificio y se observa que existe un valor máximo de 60 personas a las 11:00 horas, del mismo modo se hace notar que, a pesar de que la Facultad cuenta con turno vespertino, se tiene una ocupación menor que llega a un máximo de 36 personas a las 17:00 horas.

Tabla A3-1. Censo de población horario de la DICyG

Hora	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
No. Personas	14	29	41	54	60	59	58	50	28	29	36	33	26	6

El valor promedio de ocupantes a lo largo de un día común en la DICyG es de aproximadamente 38 personas, sin embargo, se tomó 60 como dato final en cuanto al número de personas que laboran en el edificio debido a que no se conocen datos precisos de consumo de agua y la Tabla A3-2 no presenta las condiciones específicas de los estudios realizados para obtener los valores presentados.

La Figura A3-1 muestra el comportamiento de la población perteneciente a la DICyG con acceso a sanitarios despreciando por completo la población flotante (alumnos y personal sin acceso a estos servicios).

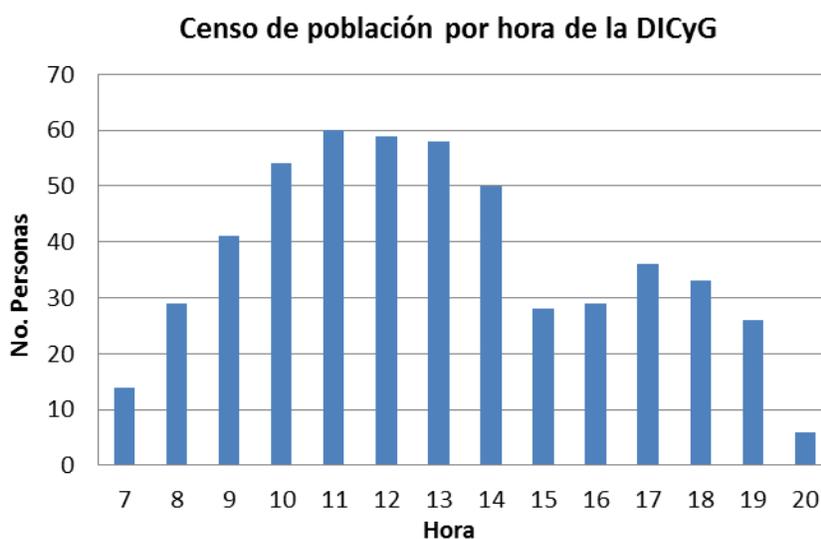


Figura A3-1. Censo de población por hora de la DICyG

Para los cálculos, según la bibliografía consultada (Comisión Nacional del Agua, 2009) se adopta el criterio de aceptar como aportación de aguas negras el 75% de la dotación de agua potable considerando que el 25% restante se consume antes de llegar a los conductos. De acuerdo a la Tabla A3-2, que muestra la dotación mínima de agua potable dependiendo del tipo de construcción, para cualquier tipo de oficinas se tiene como mínimo una dotación de 50 litros por persona al día.

Tabla A3-2. Dotación mínima de agua potable

TIPOLOGÍA	DOTACIÓN
I. HABITACIONAL	
I.1 Vivienda de hasta 90 m ² construidos	150 l/hab/día
I.2 Vivienda mayor de 90 m ² construidos	200 l/hab/día
II. COMERCIAL	
II.1 Comercios	6 l/m ² /día
II.2 Mercaos públicos y tianguis	100 l/puesto/día
III. SERVICIOS	
III.1 Servicios administrativos y financieros	50 l/persona/día
III.1 Oficinas de cualquier tipo	
III.2 Servicios automotrices	100 l/trabajador/día

Adaptado de las normas técnicas complementarias para el diseño y ejecución de obras e instalaciones hidráulicas, Octubre 2004

Considerando una población de 60 personas y una aportación del 80% de dotación de agua potable de aguas negras se tiene:

$$\text{Generación de agua residual} = \text{No. personas} \cdot \text{Dotación} \cdot \% \text{Aporte}$$

$$\text{Generación de agua residual} = 60 \text{ personas} \cdot (50 \text{ L/persona/día}) \cdot 0.8$$

$$\text{Generación de agua residual} = 2,400 \text{ L/día}$$

La generación estimada de agua residual de la DICyG fue de 2,400 litros al día, mayor al gasto de diseño (1,720 litros al día). Cumpliendo los objetivos de esta actividad se muestra la Figura A3-2, que representa la comparación de las curvas de descarga obtenidas en los aforos y su relación con el número de personas que laboran en el edificio durante un día común. En esta figura se observa: (1) la diferencia de la generación de agua residual en los aforos realizados, resultando mayor el segundo durante todo el tiempo de medición y (2) que sí existe relación entre el comportamiento de las curvas y el número de personas del edificio. Esta relación es notoria cuando se pone atención en las horas pico, es decir, durante el horario matutino se encuentra la mayor generación de agua residual y al mismo tiempo la mayor concentración de personal en el edificio. En el turno

vespertino se observa una menor presencia de personal en el edificio al igual que una menor generación de agua residual.



Figura A3-2. Relación entre las curvas de descarga promedio y el censo de la DICyG

Se debe tener en cuenta que el censo se realizó en forma de encuesta, por lo que no necesariamente se tiene una relación directamente proporcional a las curvas obtenidas en los aforos, es decir, los aforos realizados corresponden a fechas específicas de distintos años (2010 y 2011), sin embargo, en estas fechas no se obtuvo el número de personas en el edificio. Si esto se hiciera, se tendría una relación directa entre el caudal generado de aguas negras y la población del edificio, esto sale del alcance de este trabajo.

Resultados

Como resultado se obtuvo un gasto estimado de agua residual de 2,400 litros por día según las consideraciones descritas en la metodología. Si se toman en cuenta los aforos realizados anteriormente se observa que el valor determinado en este estudio es mayor al medido en el segundo aforo, que a su vez, es mayor al primer aforo (Censo = 2,400 > 2º aforo = 2,170 > 1er aforo = 1,326 [L/día]). La variación entre el valor calculado en el censo y el obtenido en el segundo aforo es de 230 litros por día que representa poco más del 10% de este último. Esta diferencia se debe a que ambas actividades se realizaron en distintas fechas, sin embargo, en forma abstracta mantienen una relación directa.

Como parte de los resultados se generó también la Figura A3-2 que corresponde a la relación entre las curvas de descarga promedio de cada aforo y este censo realizado en la DICyG.

Conclusiones

Este censo de población y los respectivos cálculos para estimar la generación de agua residual por la DICyG confirman los datos obtenidos durante el segundo aforo, donde se observa que existe un aumento de generación que va de 1,326 a 2,170 litros por día. La variación entre las últimas actividades realizadas (censo y 2º aforo) es de cerca del 10% y probablemente se debe a que se realizaron en fechas distintas.

La manera más exacta de obtener el caudal de agua residual generado por la DICyG es con la instalación de un medidor de flujo, aunque no ha sido posible su instalación. Este tipo de dispositivos, además de contar con una mayor precisión que las metodologías empleadas, proporcionan la ventaja del ahorro de tiempo y personal para estos fines.

Es importante conocer el caudal de agua residual generado actualmente ya que nos permite evaluar alternativas, ajustes o procedimiento de operación enfocados a mejorar, en la medida de lo posible, la calidad del efluente de la planta, sea para infiltración directa por medio de la grieta o, más aún, para su reúso en actividades que lo permitan.

ANEXO IV

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MANUAL DE OPERACIÓN
PLANTA DE TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES
DICYG**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL
(JUNIO 2012)**



Manual de operación
Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

INTRODUCCIÓN

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	143
OBJETIVOS GENERALES.....	144
TIPOS Y NIVELES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	145
DESCRIPCIÓN DEL PROCESO BIOLÓGICO.....	148
DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA PROPUESTO.....	150
DESCRIPCIÓN DE CADA COMPONENTE.....	154
CONFIGURACIONES DE FLUJO.....	160
PARÁMETROS DE OPERACIÓN.....	166
MÉTODOS Y MUESTREO.....	168
OPERACIÓN DE LA PLANTA.....	171
NORMAS MEXICANA APLICABLES.....	178



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El presente manual tiene por objetivo presentar los procedimientos de operación de la planta de tratamiento de aguas residuales del edificio de la División de Ingenierías Civil y Geomática. Muestra a su vez los conceptos más elementales referentes a las características de aguas residuales domésticas. Se describen los periodos de operación de la planta (escolar y vacacional). Contiene un registro base para llevar a cabo el monitoreo de acuerdo a cada periodo, así como las normas correspondientes del país.

El manual muestra también la configuración de la planta en diagramas de flujo y planos que facilitan la comprensión del operador en el manejo de la planta. Por último se incluye un apartado de bibliografía que se puede consultar con el fin de profundizar los conocimientos en la materia.

Este manual debe actualizarse de acuerdo a los cambios realizados en la planta, o el avance en el nivel de tratamiento actual y debe ser aprobado por personal encargado de su manejo, en este caso el Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería.



Manual de operación
Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

OBJETIVOS

OBJETIVOS GENERALES:

1. Enseñar las nociones básicas sobre el tema de las aguas residuales, específicamente domésticas.
2. Enseñar cómo se maneja y opera la planta de tratamiento de aguas residuales de la División de Ingenierías Civil y Geomática (DICyG) con la finalidad de que los operadores manejen adecuadamente cada uno de sus componentes.
3. Presentar las bases del funcionamiento de los procesos desarrollados en el tren de tratamiento.



Manual de operación
Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG
TIPOS Y NIVELES DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES

Tipos de tratamiento de aguas residuales

El objetivo de los diferentes tipos y niveles de tratamiento es en general, reducir la carga de contaminantes del vertido (o agua residual) y convertirlo en inocuo para el medio ambiente y salud humana.

Los tipos de tratamientos se pueden clasificar en grandes rasgos como: físicos, químicos y biológicos.

Tratamiento físico: son todos aquellos en los que se utilizan los fenómenos físicos para el tratamiento. En general se utilizan en todos los niveles. Sin embargo, algunas de las operaciones son exclusivas de la fase de pre-tratamiento. Algunas de las operaciones físicas son:

- Tamizado
- Homogenización de caudales
- Intercepción de aceites y grasas
- Mezclado

Tratamiento químico: son aquellos procesos en los que la eliminación de los contaminantes presentes en el agua residual se lleva a cabo mediante la adición de reactivos químicos, o bien mediante las propiedades químicas de diversos compuestos. Se utiliza junto con tipos físicos y biológicos. Algunas de las operaciones químicas son:

- Coagulación – floculación. Adición de químicos (sales de hierro, aluminio, etc). cambiar la carga de las partículas coloidales con el fin de propiciar la unión de éstas y facilitar su precipitación.
- Precipitación química. Eliminación de metales pesados con la adición de cal, hidróxido de sodio, etc.



Manual de operación

Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

TIPOS Y NIVELES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Tratamiento biológico: Aquellos procesos basados en el metabolismo de microorganismos presentes en el agua residual para la remoción de los contaminantes. Los principales procesos biológicos utilizados para el tratamiento de aguas residuales se dividen en dos categorías:

- Crecimiento suspendido. Los microorganismos responsables de la transformación de la materia orgánica en el agua residual a gases y tejido celular se mantienen en suspensión dentro del líquido.
- Crecimiento fijo. Los microorganismos responsables de la transformación de la materia orgánica en el agua residual a gases y tejido celular están sujetos a un medio inerte.

Otra clasificación dentro del tratamiento biológico es con base en la presencia o ausencia de oxígeno molecular. Cuando existe oxígeno molecular en el agua residual el proceso es aerobio y en ausencia de éste se considera anaerobio.

Niveles de tratamiento de aguas residuales

El grado de tratamiento requerido para un agua residual depende fundamentalmente de los límites de vertido para el efluente. Los niveles de tratamiento son los siguientes:

Tratamiento primario: se emplea para la eliminación de los sólidos en suspensión y los materiales flotantes, impuesta por límites, tanto de descarga al medio receptor como para poder llevar los efluentes a un tratamiento secundario, bien directamente o pasando por una neutralización u homogenización. Este nivel de tratamiento incluye:

- Cribado
- Sedimentación
- Flotación
- Separación de aceites



Manual de operación
Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG
TIPOS Y NIVELES DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES

- Neutralización
- Homogenización

Tratamiento secundario: comprende, generalmente, tratamientos convencionales de tipo biológicos donde se trata de reducir el contenido en materia orgánica acelerando los procesos biológicos naturales. Este nivel de tratamiento comprende:

- Tratamientos aerobios: lodos activados y modificaciones al sistema convencional, aireación prolongada, lagunas de aireación, filtros percoladores, discos biológicos (biodiscos), etc.
- Tratamientos anaerobios: biodigestores, filtros sumergidos, etc.

Tratamiento terciario: su objetivo fundamental es la eliminación de contaminantes que no se eliminan con los tratamientos biológicos convencionales. A este nivel se tiene:

- Microtamizado
- Filtración (lecho de arena, antracita, etc.)
- Precipitación y coagulación
- Adsorción (carbón activado)
- Intercambio iónico
- Ósmosis inversa
- Electrodialisis
- Cloración y ozonización
- Procesos de reducción de nutrientes
- Otros



Manual de operación

Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO BIOLÓGICO

El tren de tratamiento de la planta de la División de Ingenierías Civil y Geomática tiene, hasta ahora, un nivel de tratamiento secundario basado en el rendimiento de un contactor biológico rotatorio (CBR) o biodisco. El funcionamiento de un sistema de tratamiento con biodiscos es simple (Figura A4-1. Tren de tratamiento convencional con biodiscos), consiste básicamente en un sedimentador primario, donde se remueven las partículas más grandes por gravedad; posteriormente el agua pasa a un reactor de contactores biológicos rotatorios, que es un proceso de tratamiento basado en la formación de biomasa fija; y finalmente se cuenta con un sedimentador secundario para la separación de sólidos del agua. Es común que se lleve a cabo la cloración del efluente del clarificador secundario como medio de desinfección.

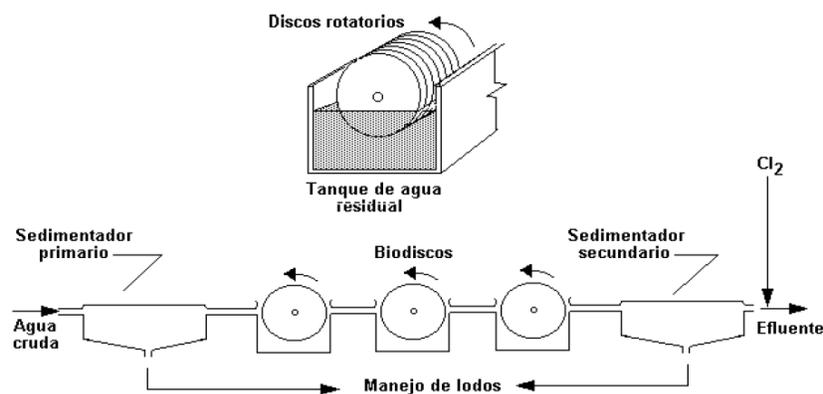


Figura A4-1. Tren de tratamiento convencional con biodiscos

La característica fundamental del biodisco es que los microorganismos están adheridos a la superficie del disco, el cual está parcialmente sumergido en el agua residual. Los discos de medio hidrofóbico preferentemente, están colocados en una flecha horizontal montada sobre un eje apoyado en un tanque y se encuentran sumergidos aproximadamente en un 40% del área superficial total del biodisco. Los microorganismos presentes en el agua residual comienzan a fijarse y multiplicarse en la superficie de los discos, mismos que se cubren con una película biológica de 2 a 4 mm de espesor.



Manual de operación
Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO BIOLÓGICO

Durante la rotación, el reactor se impregna con una película de agua residual, la cual absorbe oxígeno del aire para que los organismos de la película biológica fijos a los discos puedan realizar su metabolismo y remover la materia orgánica soluble en el licor dentro del reactor. El suministro de oxígeno y la remoción de la materia orgánica se efectúa mientras el sistema de discos continúe girando a través del agua residual contenida en el tanque.

Las fuerzas de fricción ejercidas sobre la película biológica provocan que el exceso de biomasa se desprenda de los discos. Esto evita la producción excesiva de la película biológica manteniéndola con un espesor casi constante que es función del sustrato removido y de la velocidad de rotación. La rotación del sistema mantiene en suspensión a la biomasa desprendida hasta que el flujo de agua la lleva fuera del reactor para su separación posterior por sedimentación.

Además, este tipo de sistemas tienen la ventaja de no requerir gran capacitación del personal de operación de la planta, bajo consumo de energía y mantenimiento, entre otras más que lo hacen adecuado para este tipo de edificios (administrativos).



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA PROPUESTO

El diagrama de flujo del sistema de tratamiento de aguas residuales propuesto se muestra en la Figura A4-2. El tren de tratamiento se describe a continuación: se capta el agua residual a partir del último registro de la instalación de evacuación del edificio con una derivación que conduce el agua hacia un cárcamo de bombeo desde donde se eleva hasta un tanque de igualación ubicado a la altura necesaria para llevar a cabo el tratamiento por gravedad. Posteriormente el agua pasa a un biodigestor, con el objetivo de reducir sólidos sedimentables, principalmente; se tiene a continuación el reactor de contactores biológicos rotatorios, donde ocurre el tratamiento biológico, para después pasar a un tanque de sedimentación secundaria, y finalmente, se cuenta con un tanque de almacenamiento del agua tratada para su posterior reúso, y en este se lleva a cabo la desinfección del efluente tratado.

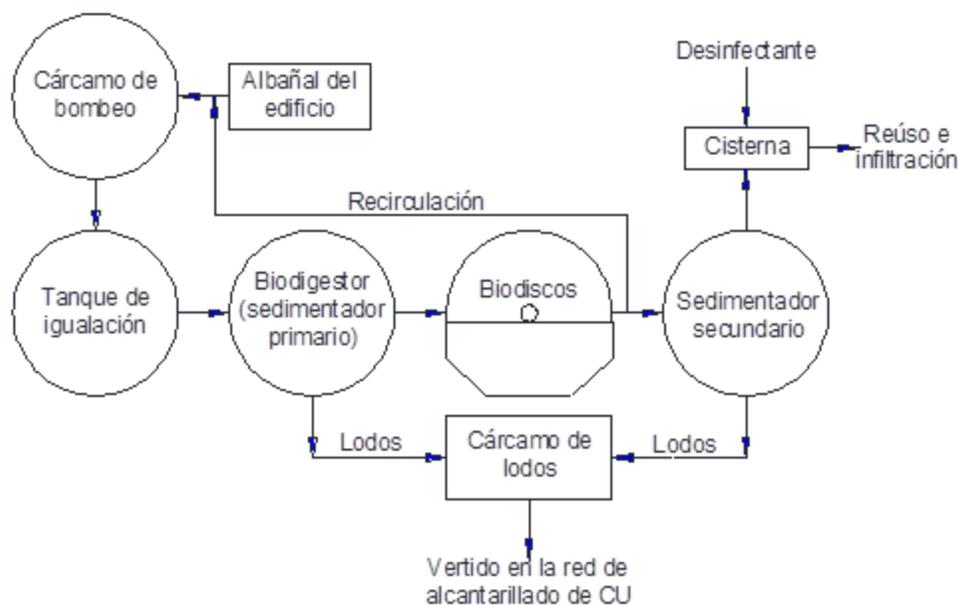


Figura A4-2. Diagrama de flujo del sistema propuesto

Para evitar el efecto de dilución o cambio de pH por lluvia, efectos de partículas suspendidas arrastradas por vientos, controlar los efectos del sol en la biopelícula como la reseca y tener un control de olores y monitoreo del sistema, se dispone de una caseta



Manual de operación
Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA PROPUESTO

que alberga el biodisco y tanque de sedimentación secundario, proporcionando un espacio semi-cerrado en el que se priorizó la entrada de aire para el sistema; además, con esto se intenta mitigar los impactos visuales negativos de la obra.

La recirculación del biodisco al cárcamo de bombeo es necesaria para los días de nulo caudal (fines de semana, días de asueto y vacaciones) proporcionando estabilidad en el biodisco. Otro punto importante el manejo y disposición de lodos, en este caso, y como lo indica el diagrama, se trasladarán a un pozo de visita de la red de alcantarillado de Ciudad Universitaria, con el fin de hacerlos llegar a la planta de tratamiento de la UNAM ubicada en la avenida Cerro del Agua.

En la Figura A4-3 se muestra el arreglo general de la planta piloto, así como la adecuación del proyecto respecto al espacio disponible, siguiendo la descripción del proceso anteriormente mencionado.

En la Figura A4-4 se ilustra el perfil hidráulico del proyecto indicando la posición de las bombas y los tramos que funcionan con flujo a gravedad. También se puede notar que la carga estática de bombeo es de aproximadamente 4 metros, y estimando en 15% de esta elevación las pérdidas debidas a la fricción y secundarias, entrando en la curva característica de la bomba (con 4.6m de carga) daría un gasto Q de 100 litros por minuto.



Manual de operación
Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG
DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA PROPUESTO

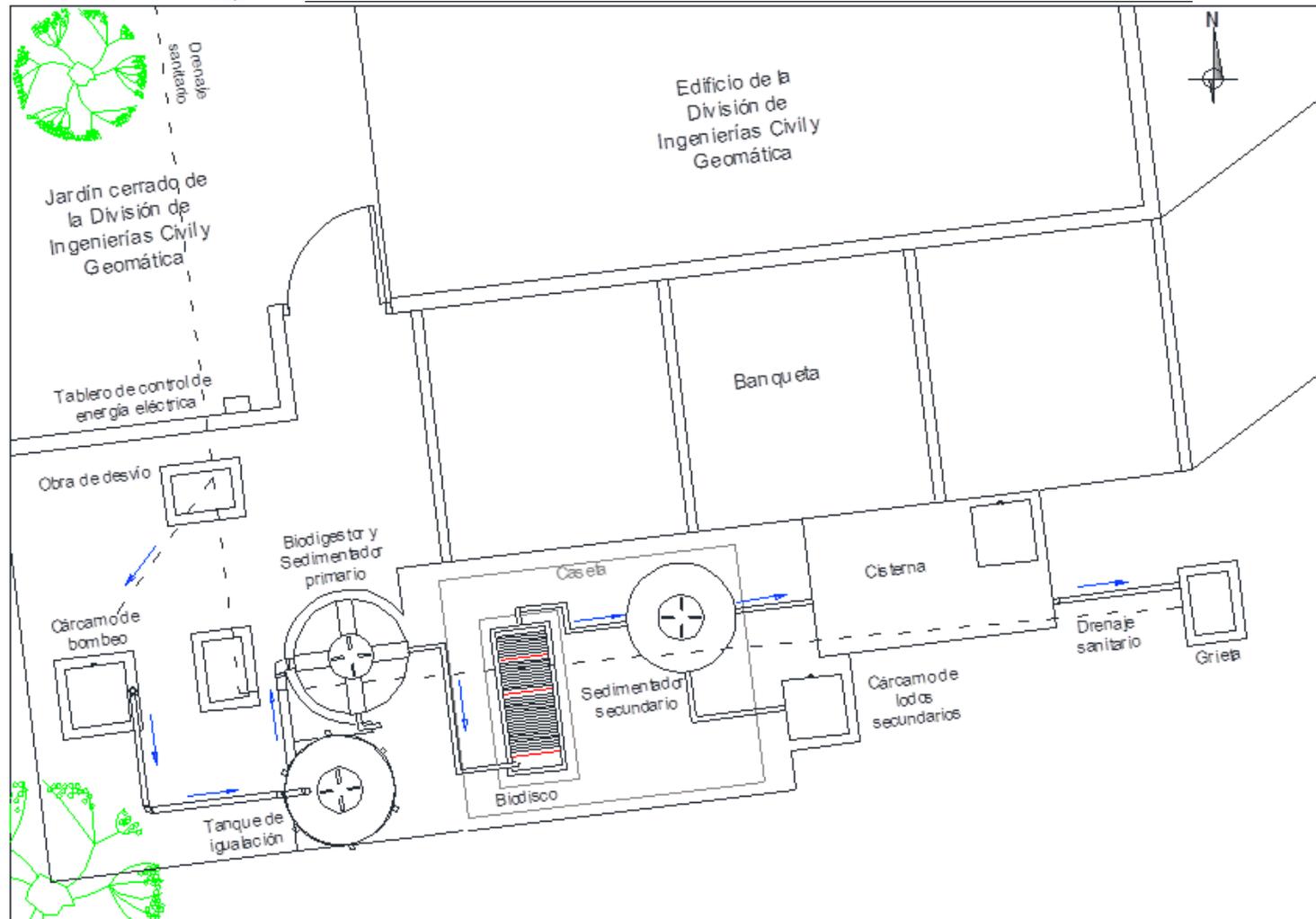


Figura A4-3. Vista de planta de los componentes de la planta y el sentido de flujo



Manual de operación
Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG
DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA PROPUESTO

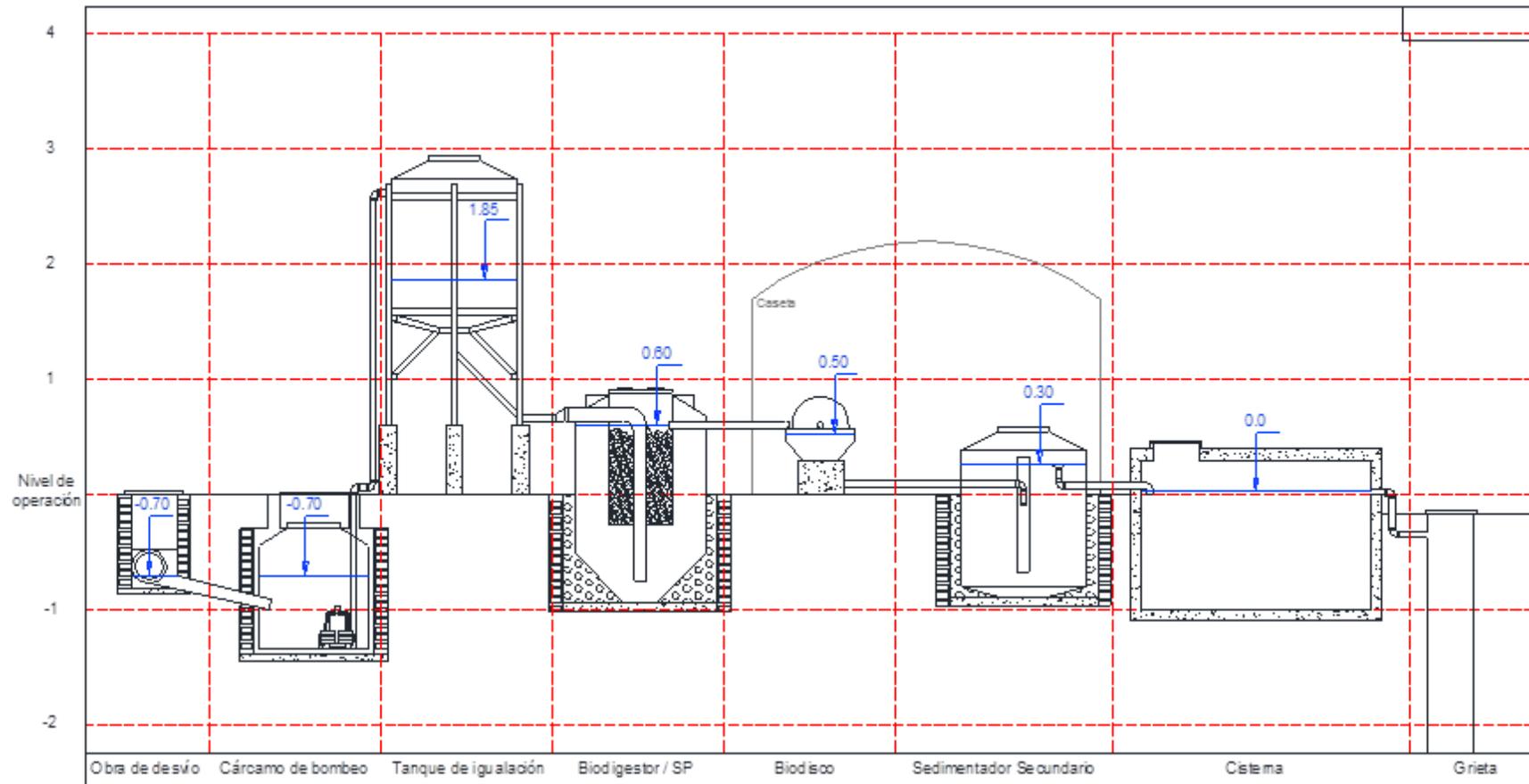


Figura A4-4. Perfil hidráulico de la planta



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG DESCRIPCIÓN DE CADA COMPONENTE

CÁRCAMO DE BOMBEO

La primera modificación realizada en la instalación de evacuación de aguas residuales del edificio fue el desvío del drenaje hacia un cárcamo de bombeo a partir de un registro construido sobre el albañal original. El cárcamo de bombeo es un tanque de polietileno de alta densidad con capacidad de 600 litros. Su base se encuentra a 1.30 metros de profundidad y consta de una plantilla de concreto simple, también está reforzado lateralmente con un muro de tabique juntado con concreto (Figura A4-5).

La bomba instalada es de 1/3 H.P. y tiene la capacidad de suministrar un gasto aproximado de 100 litros por minuto a una altura de 5 metros según la curva de rendimiento proporcionada por el fabricante donde se observa que la altura máxima de trabajo es de aproximadamente 7 metros.

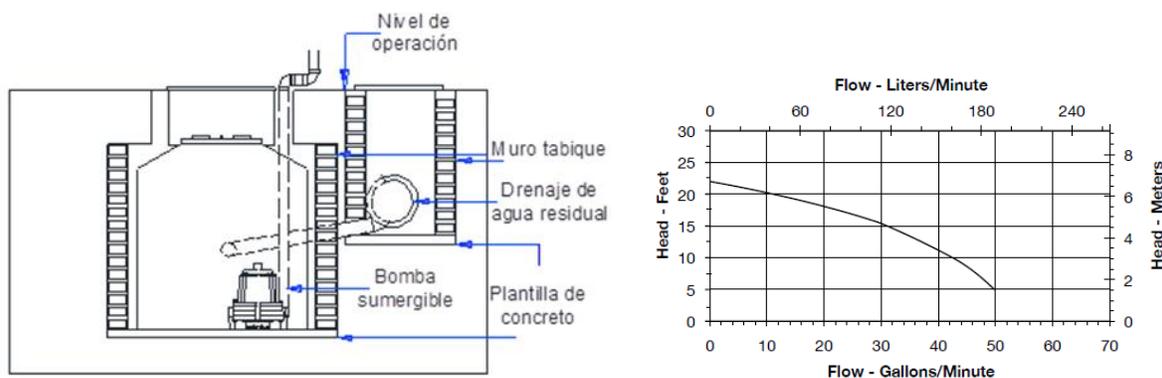


Figura A4-5. Izq.- Obra de desvío y cárcamo de bombeo. Der.- Curva de rendimiento de la bomba sumergible.

La operación de la bomba es por medio de electroniveles, los cuales fueron instalados en el cárcamo de bombeo y el tanque de igualación. Además, otra ventaja que ofrece esta bomba instalada es su altura (aproximadamente 25 cm) ya que permite contar con un nivel de agua mínimo en el tanque de hasta 15 cm. De acuerdo al gasto promedio ($1.7 \text{ m}^3/\text{d}$) obtenido se previó que la bomba funcionaría entre 3 y 4 veces al día.



Manual de operación

Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

DESCRIPCIÓN DE CADA COMPONENTE

TANQUE DE IGUALACIÓN

El tanque de almacenamiento es de forma cónica invertida y con una elevación de 1.5 metros sobre el nivel del terreno para garantizar el flujo por gravedad en todo el sistema (Figura A4-4); la capacidad es de 1100 litros, la forma cónica de la tolva se propuso en el diseño para evitar el asentamiento de sólidos en el fondo. Se encuentra montada sobre una estructura metálica que provee el acceso a la superficie del tanque por medio de una escalera para su mantenimiento. Otra función de esta unidad es la de homogenizar las características del agua residual.

BIODIGESTOR PRIMARIO

El biodigestor del sistema permite amortiguar picos de materia orgánica y homogeneizar sustancias químicas empleadas por el personal de limpieza o de algún derrame accidental; además, retiene la entrada de sólidos al biodisco. En este proyecto se determinó el uso de un tanque de 1300 litros de capacidad, ya que puede tratar la generación de aguas de 50 personas en oficinas, el tratamiento es anaerobio y se lleva a cabo por bacterias fijas en el material de fijación (PET) dentro del tanque. Su fabricación proporciona la evacuación de lodos de forma sencilla y sin necesidad de energía adicional de algún tipo.

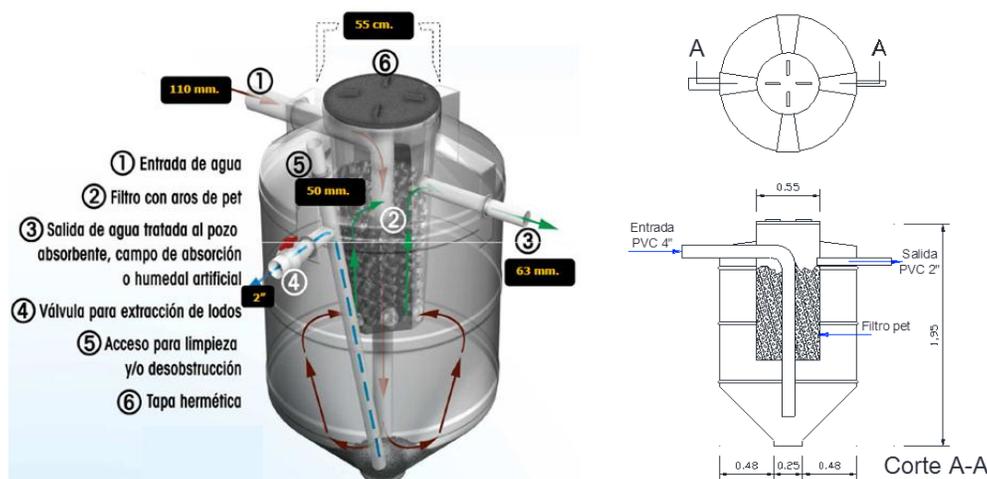


Figura A4-6. Componentes del biodigestor autolimpiante (izq). Corte transversal (der)



Manual de operación

Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

DESCRIPCIÓN DE CADA COMPONENTE

La Figura A4-6 describe el funcionamiento del biodigestor y presenta el corte transversal correspondiente a la circulación del agua residual. Su instalación en el sistema para este proyecto se muestra en la Figura A4-4.

CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATORIO (BIODISCO)

Consiste en un tanque cilíndrico con un eje central de acero que soporta un medio plástico corrugado. El eje tiene una rotación lenta y los medios plásticos se sumergen en un 35% aproximadamente dentro del nivel del agua residual. El eje está soportado sobre los bordes del tanque por medio de baleros y está dividido en tres etapas; la primera con 18 discos y las otras dos etapas con 9 discos cada una. Además, está provisto de cubetas de alimentación ubicadas sobre los brazos sujetos al eje de rotación.

El arreglo del biodisco cuenta con puntos de obtención de muestras en cada una de las tres etapas para determinar su rendimiento a lo largo del tanque (Figura A4-7). Además, se instaló una tubería para las demasías, con el fin de evitar el desbordamiento del agua y se aprovecha para hacer una recirculación hacia el cárcamo de bombeo para usarse en los fines de semana., ya que el gasto descargado se reduce significativamente (casi nulo).

Otras características:

Área superficial: 23 m²

Relación volumen del tanque / área superficial: 0.005 m³/m² (nominal) con biomasa

Diámetro del disco: 0.5 metros

Número de discos: 18 la primera etapa y 9 cada una de las dos siguientes.

Longitud de cada etapa: 66 cm 1ª etapa y 33 cm cada una de las dos siguientes.

Revoluciones de la flecha: 7

Velocidad periférica media: 0.86 m/s

Motor: Westinghouse, 115 Volts, 0.25 H.P., monofásico.



Manual de operación

Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

DESCRIPCIÓN DE CADA COMPONENTE

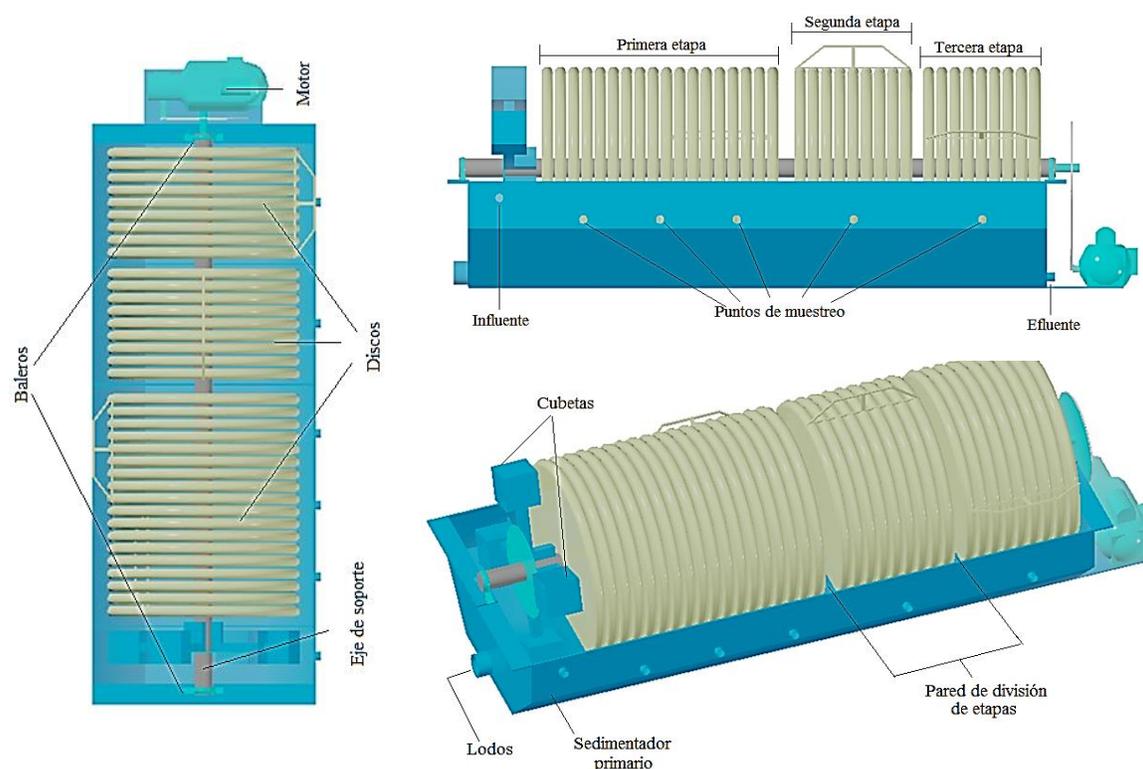


Figura A4-7. Componentes del biodisco instalado en la planta

La salida del efluente del biodisco se encuentra en la parte inferior de la última etapa y está controlada por una válvula de compuerta que restringe la salida del efluente, permitiendo el llenado del tanque y el control del tiempo de retención en el mismo.

SEDIMENTADOR SECUNDARIO

El tanque de sedimentación se encuentra instalado en una excavación de un metro de profundidad, se trata de una tolva de las mismas características que el tanque de igualación; sin embargo, se adaptaron las salidas del lodo y el agua clarificada. Dichos arreglos se realizaron siguiendo los mismos principios identificados en el sedimentador primario. La extracción de lodos se realiza de acuerdo a los resultados de sólidos sedimentables.



Manual de operación

Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

DESCRIPCIÓN DE CADA COMPONENTE

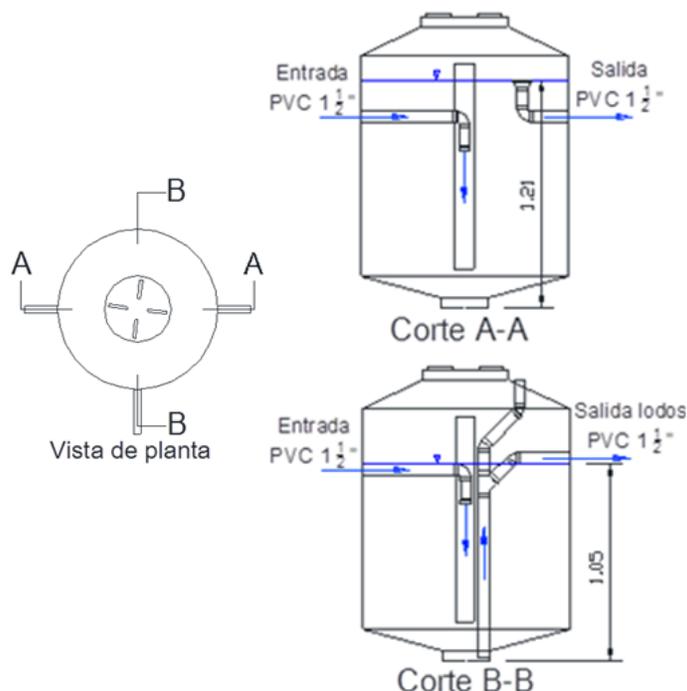


Figura A4-8. Configuración del tanque de sedimentación secundaria

CISTERNA DE AGUA TRATADA

El tanque de almacenamiento tiene una capacidad de 2 m^3 y es básicamente una cisterna colocada a un lado del sedimentador secundario, suficiente para almacenar el agua tratada de un día y permitir la aplicación de hipoclorito de calcio para la desinfección, sin embargo, no se han instalado aún el compartimento de pastillas de cloro en el influente para el contacto con el agua tratada ni las mamparas que definen el flujo del agua en la cisterna a fin de garantizar la mezcla y el tiempo de contacto. El efluente está ubicado a un metro de la base de la cisterna y está dirigido hacia la grieta de infiltración para evitar el desbordamiento del agua tratada. Cabe señalar que su uso en servicios está restringido por la calidad del efluente del sedimentador secundario, ya que puede generar problemas de sedimentación, color u olores.



Manual de operación

Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

DESCRIPCIÓN DE CADA COMPONENTE

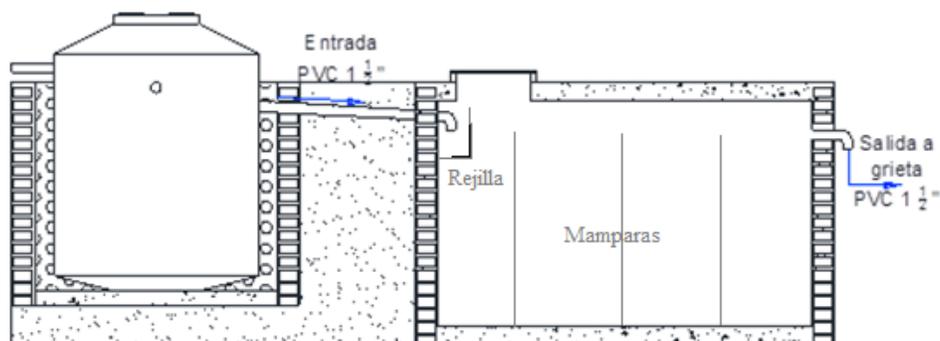


Figura A4-9. Diseño de cisterna con mampara y rejilla para la dosificación de cloro

Los detalles de diseño, cálculos y consideraciones de cada componente se encuentran en el capítulo III de este trabajo¹. Sin embargo, la planta debe adecuarse a las necesidades futuras, por lo que cualquier modificación debe estar registrada en este manual al igual que el formato de aprobación del departamento responsable del manejo de la planta.

¹ (Empleo de biodiscos en el tratamiento de aguas residuales generadas en un edificio de Ciudad Universitaria, 2012)



Manual de operación

Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

CONFIGURACIONES DE FLUJO

La Figura A4-2 presenta el diagrama de flujo general de la planta, sin embargo, existen diferentes configuraciones para su funcionamiento. Esto es posible gracias a las válvulas que controlan el paso del agua residual y a las interconexiones de las tuberías dentro del sistema. A continuación se describen las opciones de configuración de acuerdo a las opciones posibles, así como su objetivo.

Configuración general. En la Figura A4-10 se muestra el diagrama general de conexiones y se identifican las distintas rutas posibles para el agua residual de acuerdo a cada componente. En las siguientes configuraciones se explican las razones de éstas.

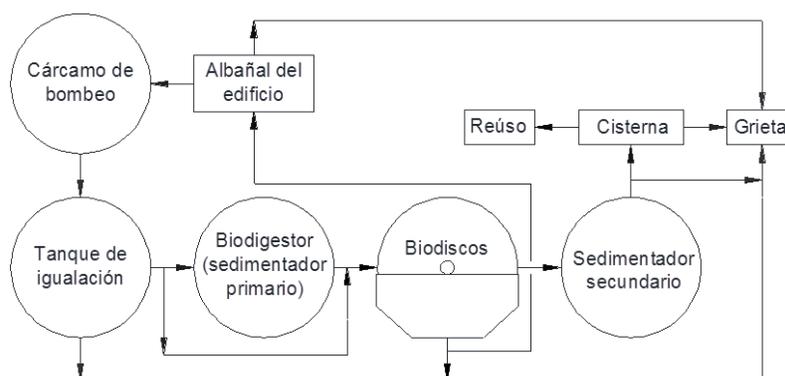


Figura A4-10. Diagrama general de conexiones

Configuración original. Se refiere al flujo del agua residual de la manera en que se efectuaba antes de la construcción del proyecto. Esto se logra sólo con el cárcamo de bombeo lleno, es decir, la conexión entre el albañal y el cárcamo alcanza un nivel máximo en el cual el tubo que desvía el agua residual al primero queda completamente lleno, forzando la salida del agua hacia el drenaje original (Figura A4-11). También se puede entender como una tubería de demasías, la cantidad de agua residual que se genere cuando el tanque de igualación está lleno al igual que el cárcamo está obligada a pasar por el drenaje original hasta descargar en la grieta.



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

CONFIGURACIONES DE FLUJO

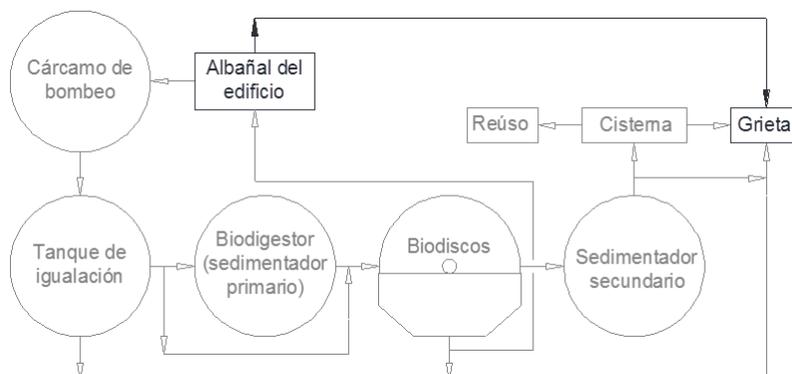


Figura A4-11. Diagrama de flujo original

Configuración de estabilidad del biodisco. Toda planta con tratamiento biológico cuenta con una etapa de arranque donde se comienza la operación para estabilizar el proceso, en este caso la Figura A4-12 muestra el diagrama de flujo para el arranque de la planta. El tiempo de estabilización varía entre 4 y 5 semanas, al final tanto el biodigestor como el biodisco cuentan con una biopelícula estable.

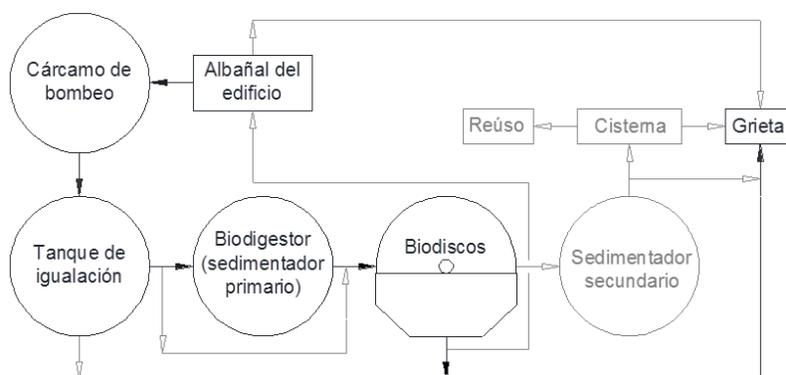


Figura A4-12. Diagrama de flujo de arranque de la planta

Configuración de funcionamiento con sedimentador secundario. Una vez estabilizado el sistema se comienza con la operación del sedimentador secundario, la extracción de lodos está en función de la cantidad de sólidos sedimentables registrados en laboratorio. En principio, la salida del sedimentador secundario está dirigida hacia la grieta para la



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

CONFIGURACIONES DE FLUJO

infiltración (Figura A4-13), sin embargo, en cuanto la calidad del efluente lo permita, se debe efectuar el cambio hacia la cisterna. Cabe mencionar que el proyecto permite cambios en las instalaciones en caso de requerir la adición de algún químico para acelerar la precipitación en el tanque.

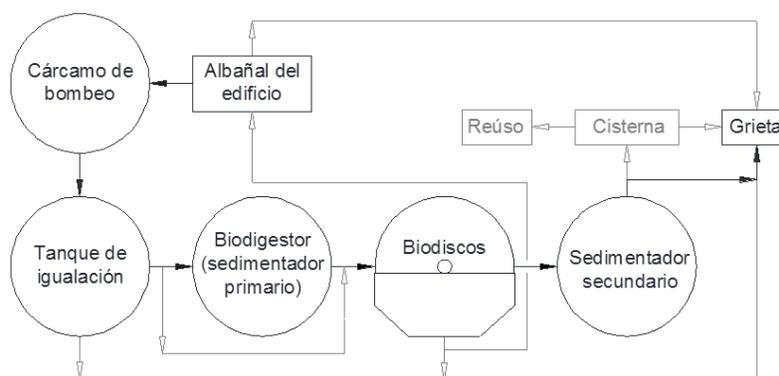


Figura A4-13. Diagrama de flujo con sedimentación secundaria

Configuración de desinfección y reúso. En esta configuración se encuentran en funcionamiento todos los componentes del sistema. La desinfección es el último tratamiento que recibe el agua antes de que se infiltre o se reúse (Figuras Figura A4-14 y Figura A4-15). Este proceso es por medio de pastillas de cloro en el influente de la cisterna, de tal manera que se garantice el contacto. La dosificación depende de las pruebas de laboratorio, y para evitar contaminación del agua en la cisterna, deben realizarse diariamente.

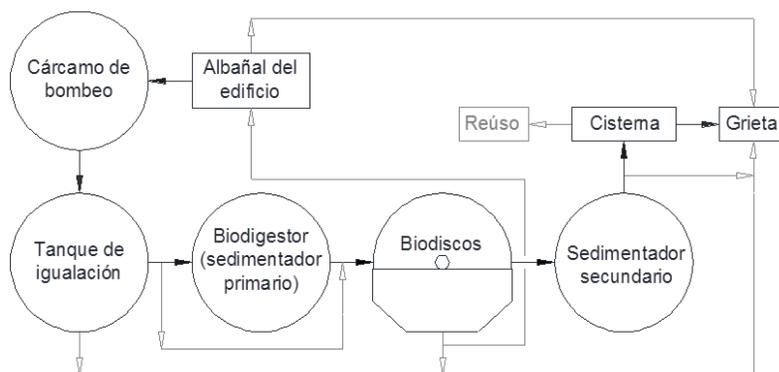


Figura A4-14. Diagrama de flujo con desinfección



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

CONFIGURACIONES DE FLUJO

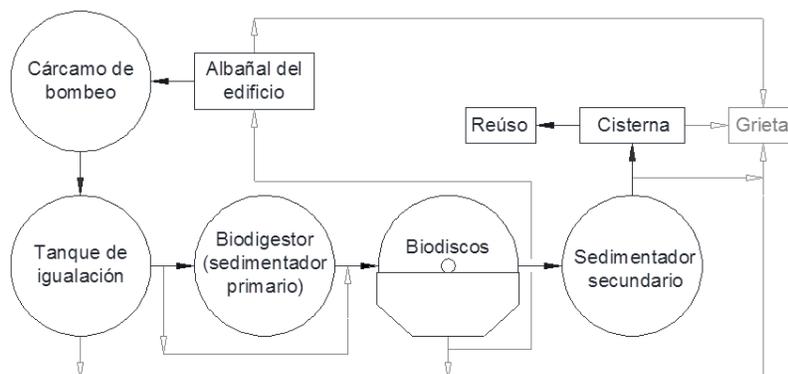


Figura A4-15. Diagrama de flujo con reúso

El reúso del agua depende de la calidad del efluente, sin embargo, hasta ahora no se cuenta con la instalación necesaria para hacer uso del agua tratada en los sanitarios o riego.

Configuración de operación de fines de semana. De acuerdo a las actividades del edificio, en los fines de semana y días de asueto académico la generación de agua residual es casi nula. Sin embargo, la recirculación del biodisco al cárcamo de bombeo y la capacidad del tanque de igualación permiten mantener operando el sistema (Figura A4-16). En casos prolongados se pueden almacenar lodos en el sedimentador primario y posteriormente diluirlos en el tanque de igualación para aumentar la carga orgánica.

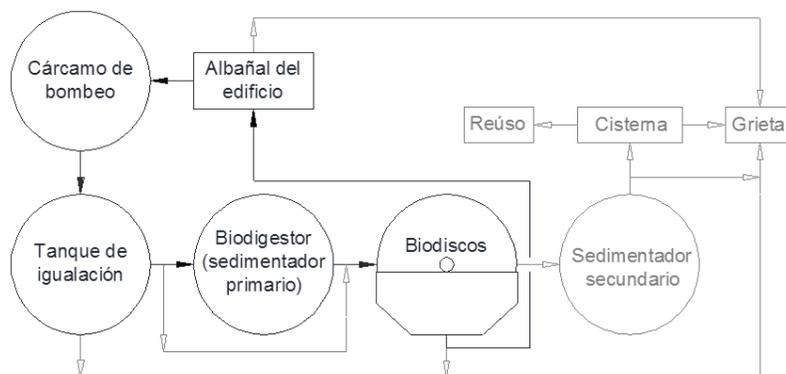


Figura A4-16. Diagrama de flujo en fines de semana y días de asueto



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

CONFIGURACIONES DE FLUJO

Configuración de operación en periodo vacacional. En el periodo vacacional la generación de agua residual es nula y por un lapso de 3 semanas consecutivas. Sin la adición de sustrato los microorganismos mueren y el rendimiento se afecta severamente, esto implicaría el arranque del sistema nuevamente con el tiempo correspondiente para ello. Por esta razón, el diagrama de flujo del agua residual se modifica utilizando la recirculación del biodisco al cárcamo de bombeo excluyendo el sedimentador primario (Figura A4-17) y, en el tiempo que se determine, la dilución de lodos en el tanque de igualación con el fin de mantener viva y activa la biopelícula (Figura A4-18). Ésta última opción debe ser evaluada con análisis en laboratorio ya que los fenómenos que involucran los procesos anaerobios en los lodos pueden repercutir en las características del agua residual, principalmente valores de pH. Se tiene la opción de utilizar el sedimentador primario en caso de requerirse.

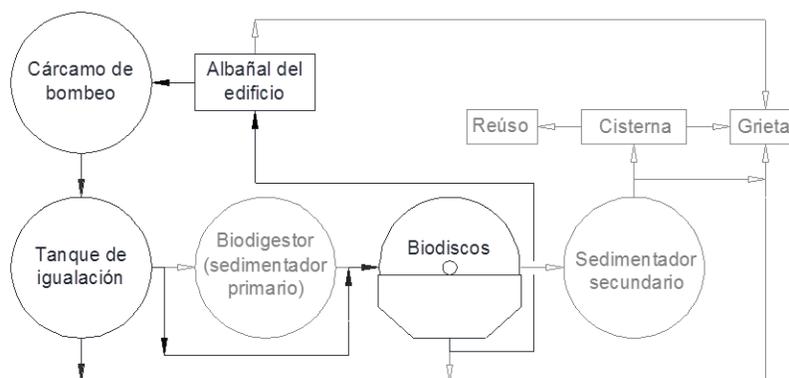


Figura A4-17. Diagrama de flujo en periodo vacacional sin dilución de lodos

La ventaja de mantener la biopelícula viva y sana es la reducción del tiempo de estabilización una vez iniciado el periodo escolar.



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

CONFIGURACIONES DE FLUJO

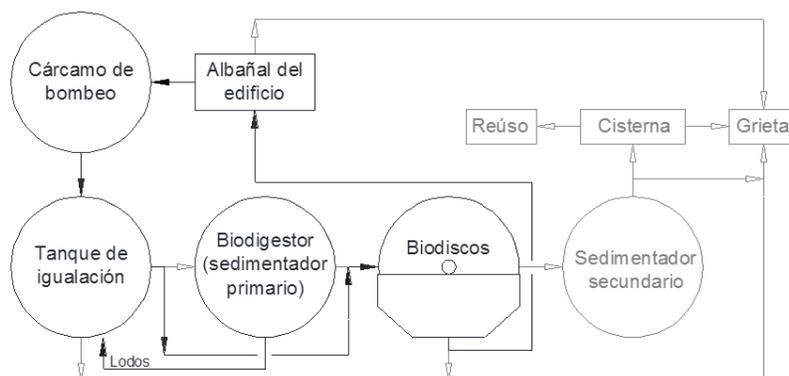


Figura A4-18. Diagrama de flujo en periodo vacacional con dilución de lodos

Configuración de demasías del tanque de igualación. El flujo entre el cárcamo de bombeo y el tanque de igualación se encuentra regulado por electroniveles tipo pera, por lo que existe la posibilidad de que alguno de éstos no funcione correctamente al encontrar obstrucciones en su trayectoria. Por esta razón, se instaló una tubería de demasías en la parte superior del tanque de igualación y ésta se encuentra conectada con la grieta (Figura A4-19).

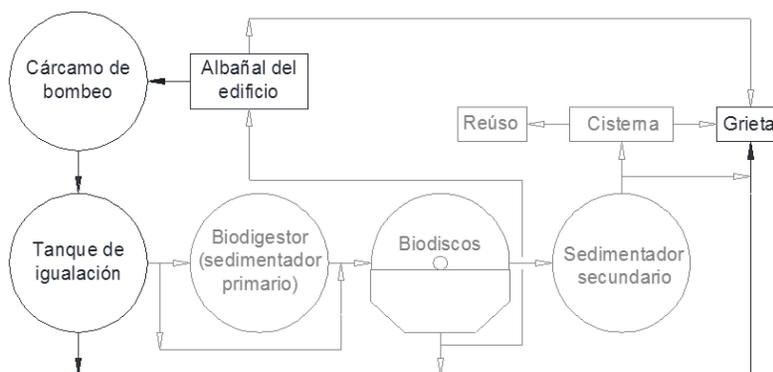


Figura A4-19. Diagrama de flujo de la obra de demasías del tanque de igualación



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

PARÁMETROS DE OPERACIÓN

PARÁMETROS DE OPERACIÓN

Las características del agua residual que se tomaron como base para el diseño de la planta y en la cuáles radica su buen funcionamiento se describen en la Tabla A4-1.

Tabla A4-1. Características del agua residual a tratar

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio
Gasto de aforo (Q) [L/d]	1,030	1,630	1,326
Gasto de diseño (Q) [L/d]	1,339	2,119	1,724
pH	6.56	7.23	6.84
Temperatura [°C]	14	18	16
Demanda Química de Oxígeno (DQO) [mg/L]	626	721	675
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) [mg/L]	180	368	284
Sólidos Totales (ST) [mg/L]	760	1,124	896
Sólidos Suspendidos Totales (SST) [mg/L]	180	330	272
Sólidos Disueltos Totales (SDT) [mg/L]	551	795	624
Sólidos Sedimentables (SSe) [ml/L]	8	11	9

Posteriormente se realizó un balance de masa por componente (Figura A4-20 y Tabla A4-2) a partir del aforo y muestreo programados, además de la bibliografía consultada para conocer las recomendaciones de diseño, cualquier variación afecta el rendimiento del sistema. El gasto de operación considerado es el correspondiente al gasto de diseño promedio (1.72 m³/d).

Tabla A4-2. Resumen del balance de masa en el tren de tratamiento de agua

Parámetro	Unidad			
	Tanque de igualación	Biodigestor	Biodisco	Sedimentador secundario
Q [L/d]	1720	1705	1705	1695
DBO _T [g/d] [mg/L]	488	318	45	41
	284	186	26	24
SST [g/d] [mg/L]	468	164	164	106
	272	96	96	63



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

PARÁMETROS DE OPERACIÓN

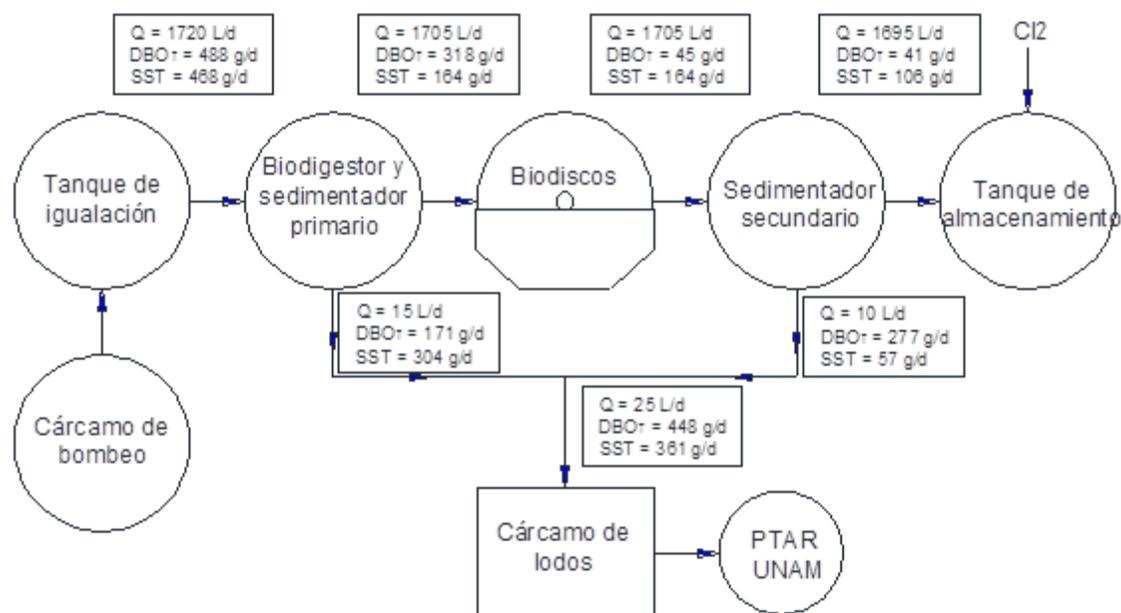


Figura A4-20. Diagrama de proceso y balance de masa por componente de la planta piloto



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

MÉTODOS Y MUESTREO

Los parámetros que se emplean en el monitoreo de la planta son: DBO₅, DQO, STT, SST, SDT, SSe, pH y temperatura, en los cuales se basa la evaluación del rendimiento del sistema. En cuanto a patógenos, se llevan a cabo análisis para la determinación de huevos de helminto y coliformes. Por esta razón, es necesario conocer los métodos de análisis a utilizar para cada uno de ellos, así como efectuar la programación de la obtención de muestras. Estos análisis se efectúan de acuerdo con los métodos estandarizados (Association American Public Health, 1998) y con las normas mexicanas aplicables. La frecuencia de muestreo y análisis se encuentra regida por el nivel de tratamiento y el personal disponible para el trabajo de laboratorio.

Para la DBO₅ la prueba debe efectuarse el mismo día de obtención de la muestra con el fin de evitar alteraciones en los resultados, el método recomendado es el 5120 B (Association American Public Health, 1998). Para los STT, SST, SDT y SSe se emplea la misma muestra obtenida para determinar la DBO, utilizando la norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001, los sólidos sedimentables determinan la cantidad de lodos a extraer de la unidad. En cuanto a la DQO se recomienda que las pruebas se realicen diariamente, debido a que es un parámetro que sirve para conocer el comportamiento del sistema de manera rápida, en comparación con el análisis de DBO, y permite tomar decisiones en tiempo real. El método para su determinación es el llamado *dicromato de potasio*, correspondiente al número 5220 B (Association American Public Health, 1998). En cuanto al pH y temperatura, se puede hacer uso de cualquier instrumento de medición disponible en laboratorio para su medición. Los análisis bacteriológicos se realizan con base en las normas NOM-112-SSA1-1994 para coliformes y NMX-AA-113-SCFI-1999 para huevos de helminto. El procedimiento de muestreo se encuentra regido por la Norma Mexicana NMX-AA-003 en el caso de pruebas físicas y químicas, para las pruebas bacteriológicas se deben seguir los procedimientos emitidos por las normas correspondientes.



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

MÉTODOS Y MUESTREO

PUNTOS DE MUESTREO

Existen en total siete puntos recomendados para realizar el muestreo, tal como se muestra en la Figura A4-21. El punto A corresponde a las características del agua residual cruda, es decir, contiene las características del influente de la planta. Su obtención se realiza en el cárcamo de bombeo con ayuda de un muestreador debido a que esta unidad se encuentra por debajo del nivel de operación. En este punto en particular resulta difícil llevar a cabo el muestreo debido a la presencia de materia flotante y a que los sólidos suspendidos comienzan a depositarse en el fondo del tanque, por lo que se recomienda mezclar lo mejor posible el agua y evitar la presencia de materia flotante en la muestra obtenida.

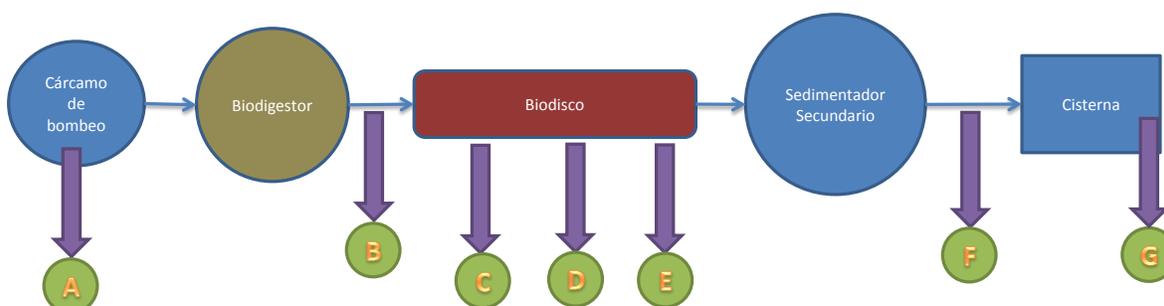


Figura A4-21. Puntos de muestreo recomendados de la planta

El punto B se encuentra en la alimentación al biodigestor y permite la evaluación del rendimiento del sedimentador primario (biodigestor). Dicha alimentación cuenta con un vertedor triangular adaptado para la medición del caudal de la planta y requiere de limpieza después de lapsos grandes de operación debido a posibles obstrucciones producto del desprendimiento de la biopelícula en el biodigestor.

Los puntos C, D y E pertenecen a la unidad de biodiscos y corresponden a cada etapa. Se pueden muestrear los tres puntos si se desea evaluar el desempeño de esta unidad, de lo contrario los valores del influente al biodisco corresponden a los obtenidos en el punto B y los parámetros de salida se deben evaluar en el punto E. Cada uno de estos tres puntos



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

MÉTODOS Y MUESTREO

cuenta con válvulas de tipo esfera, se recomienda remover los sólidos retenidos en cada una de éstas antes de tomar la muestra.

El punto F permite evaluar el rendimiento del sedimentador secundario. Al contar con la necesidad de realizar exámenes bacteriológicos se debe evitar la contaminación de la tubería correspondiente al muestreo por lo que se recomienda mantener lo más limpio posible ésta área.

Finalmente, el punto G corresponde al análisis final del efluente de la planta para la determinación del reúso del agua tratada o infiltración.

Las opciones de muestreo de acuerdo al nivel de tratamiento alcanzado se muestran en la Tabla A4-3, se plantean como opciones debido a que está en función del personal disponible para el análisis de estos parámetros. La configuración óptima debe decidirla el operador según las necesidades y recursos disponibles.

Tabla A4-3. Opciones de análisis y muestreo según el nivel de tratamiento

Nivel de tratamiento	Unidad	Punto de muestreo				
		A	B	E	F	G
Secundario	Biodisco	1, 2	1, 2	1, 2	0	0
	Sedimentador secundario	1, 2	1	1	1, 2, 3	0
Terciario	Cisterna	1, 2	1	1	2, 3	1, 3
	Reúso	1, 2	1	1	2, 3	1, 3

0 = Se puede excluir

2 = Sólidos

1 = DBO Y DQO

3 = Bacteriológicos

La frecuencia de análisis se propone en el siguiente capítulo.



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

OPERACIÓN DE LA PLANTA

La operación de la planta se divide en dos periodos según el comportamiento de generación de agua residual en el edificio. La DICyG es parte de las instalaciones administrativas de la Facultad de Ingeniería, por lo que está sujeta a respetar el calendario de actividades emitido por la UNAM. Por esta razón los periodos que se identifican son: el escolar y el vacacional. Para el comienzo de cualquiera de estos dos periodos se debe obtener una estabilización previa del sistema, esto se explica a fondo en el arranque del sistema. De manera general, la limpieza de la planta es indispensable para evitar accidentes y prolongar la vida útil de los componentes.

ARRANQUE DEL SISTEMA

En los sistemas de película fija se debe propiciar el desarrollo de las colonias de bacterias en el material de fijación lo más pronto posible para contar con la calidad de agua tratada requerida, lo que lleva entre 4 y 5 semanas de operación continua. Es importante monitorear las aguas residuales con el fin de evitar choques orgánicos, hidráulicos o tóxicos que inhiban o perjudiquen el metabolismo de las bacterias en el sistema.

Para el arranque del sistema de tratamiento se recomienda, antes de comenzar el suministro de aguas residuales, llenar las unidades del sistema con agua de lluvia o reciclada preferentemente o, en su defecto, agua potable. Esto con el fin de identificar fugas en tuberías, el funcionamiento hidráulico, asentamientos diferenciales, etc. Finalizado esto se suministra el agua residual al sistema y comienza el periodo de estabilización. Para esto, se debe tener el diagrama de flujo correspondiente al arranque (Figura A4-12). En un principio, una vez desplazada el agua potable, se puede trabajar el biodisco como reactor batch dejando el agua residual hasta periodos de 12 a 24 horas para posteriormente dirigirla hacia la grieta de descarga. Cuando se comience a formar la biopelícula (aproximadamente una semana) se mantiene el flujo continuo con recirculación por una semana más.



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

OPERACIÓN DE LA PLANTA

Finalizado el tiempo, se recomienda direccionar el flujo hacia la grieta de descarga hasta alcanzar la estabilización del sistema. Es importante hacer énfasis en no excluir el sedimentador primario ya que cuenta con un compartimento con PET que actúa como material de fijación para la biomasa anaerobia y también es necesaria su estabilización.

Ya que se estabilizó el sistema se comienza con el funcionamiento del sedimentador secundario. Ésta unidad fue adaptada para la extracción de lodos utilizando diferenciales de nivel de agua entre la purga de lodos y la salida del efluente. Dicha extracción se encuentra en función de la pruebas de sólidos sedimentables. Al llegar a este nivel de tratamiento el diagrama de flujo debe corresponder al del funcionamiento con sedimentador secundario (Figura A4-13). La alimentación de esta unidad se encuentra regulada por una válvula de bronce tipo compuerta, misma que permite el control de nivel del agua en el biodisco. Cabe mencionar que en caso de no alcanzar la calidad esperada del efluente es conveniente el análisis de productos químicos que aceleren la conglomeración y precipitación de los sólidos presentes en esta etapa.

Una vez que se tienen los valores del efluente convenientes el diagrama de flujo es el correspondiente a la Figura A4-14, donde se dirige el agua tratada en el sedimentador secundario hacia la cisterna. Es aquí donde ocurre la desinfección mediante la adición de cloro primordialmente, la dosis se obtiene con la prueba de jarras realizada al efluente del sedimentador secundario. El tiempo de contacto es mayor al recomendado (20 minutos) debido a que la cisterna tiene la capacidad suficiente para almacenar 2 m^3 , volumen correspondiente a la generación de aguas residuales en un día.

Con la desinfección se termina el tren de tratamiento del agua, de acuerdo a los análisis bacteriológicos se determina la disposición final del agua tratada, filtración o reúso. La posibilidad actual es la primera ya que no se ha llevado a cabo el proyecto de reúso.



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

OPERACIÓN DE LA PLANTA

OPERACIÓN DURANTE EL PERIODO ESCOLAR

Una vez estabilizado el sistema comenzamos con la operación en periodo escolar, ésta consta de cinco de los seis meses del calendario semestral, durante este tiempo, la generación de agua residual de la DICyG es mayor a cero, excepto fines de semana y días de asueto donde llega a ser casi nula. Por esta razón se consideran dos tipos de manejo de la planta: en días laborables (lunes a viernes) y en días no laborables.

Manejo en días laborables. Comprende de lunes a viernes y el diagrama de flujo está en función del nivel de tratamiento que se ha logrado. Durante estos días los parámetros a analizar se encuentran en la Tabla A4-4 al igual que su frecuencia de determinación, que depende también del nivel de tratamiento. También se puede tomar en consideración el contenido de la Tabla A4-3.

Tabla A4-4. Frecuencia y parámetros a medir de acuerdo al nivel de tratamiento

Nivel de tratamiento	Unidad	pH	T	DQO	DBO	Sse	SST	SDT	HH	Col
Secundario	Biodisco	2	1	2	1	1	1	1	0	0
	Sedimentador secundario	2	1	2	1	1	1	1	1	1
Terciario	Cisterna	2	1	2	1	2	2	2	1	1
	Reúso	2	1	2	2	1	2	2	2	2

0 = No necesario

1 = Por lo menos tres veces a la semana

2 = Por lo menos cuatro veces a la semana

Es lógico que en los comienzos de operación de la planta no se obtengan los análisis bacteriológicos debido a que no se cumple con la remoción de contaminantes previa. Esta tabla es independiente al monitoreo de cada componente de la planta, es decir, al pasar de nivel de tratamiento el análisis de las unidades anteriores a éste es de menor frecuencia, sin embargo, la unidad destinada para dicho nivel debe ser estricta con la determinación de las pruebas. Por ejemplo, si el nivel de tratamiento es el terciario haciendo reúso del agua tratada, se priorizan las determinaciones en el efluente de la cisterna, haciendo menos



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

OPERACIÓN DE LA PLANTA

frecuentes las de los primeros componentes (sedimentador primario, biodisco). Esto con la finalidad de optimizar los tiempos de monitoreo de la planta. La extracción de lodos está en función de los análisis de sólidos sedimentables y de preferencia debe efectuarse constantemente, excepto en el sedimentador primario cuando exista la posibilidad del uso de éstos en el periodo de vacaciones administrativas.

El formato de registro se muestra en el capítulo de formato de registro, de igual manera se facilitó al Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental la hoja de cálculo programada para agilizar los cálculos en la determinación de parámetros.

En conclusión, la operación en este periodo depende del nivel de tratamiento obtenido, para cada nivel se muestran los diagramas de flujo en el capítulo correspondiente por lo que se debe seguir la descripción de éstos. También puede ser que se decida realizar un estudio en particular sobre alguno de los componentes de la planta, en este caso, las prioridades obedecerán los objetivos del mismo. Además, el operador de la planta debe determinar los puntos de muestreo, parámetros a evaluar de cada uno y el diagrama de flujo correspondiente de acuerdo a los recursos y necesidades del proyecto. Por último se recomienda realizar mantenimiento a los equipos que lo requieran programando actividades de manera preventiva y no correctiva.

Manejo en días no laborables. Generalmente corresponde a los fines de semana y días de asueto, sin embargo, existe la posibilidad de la combinación de éstos, lo que llamamos comúnmente puente vacacional. El rendimiento de la planta depende en gran medida de su tratamiento biológico, por lo que en estos días de nula generación de agua residual la operación es la siguiente:



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

OPERACIÓN DE LA PLANTA

- (1) Se recomienda que un día antes de los días de asueto se configure el diagrama de flujo adoptado para días no laborables (Figura A4-16) con el fin de mantener agua en el sistema en los siguientes días.
- (2) Se deben purgar de lodos del sedimentador secundario para evitar problemas de funcionamiento (sólidos emergentes).
- (3) Se puede excluir el uso del biodigestor en tiempos prolongados sin generación de agua residual (mayores a 4 días). En este caso se puede proporcionar un gasto mayor al de operación común para evitar obstrucciones por sólidos.
- (4) Se puede aprovechar la recirculación del agua para realizar mantenimiento a las unidades que no se encuentran en funcionamiento con la configuración empleada.
- (5) Al día siguiente hábil debe adaptarse la configuración del diagrama de flujo con el que se trabajó antes de los días de asueto.

Los parámetros a determinar se suspenden debido a que el Laboratorio de Sanitaria y Ambiental también se rige por el calendario escolar. Sin embargo, los parámetros como pH y temperatura pueden seguirse obteniendo porque son de medición directa.

En algunas ocasiones se pueden aprovechar los días de asueto para proporcionar mantenimiento a los equipos del sistema. En el caso específico al biodisco se recomienda girar constantemente el eje de sujeción de los discos mientras se proporciona servicio al motor por dos razones fundamentales: evitar diferenciales de espesor de la biopelícula por crecimiento en la zona con contacto al agua residual y no permitir la presencia y crecimiento de insectos en la planta. Este último fenómeno se ha observado en el tiempo de operación de la planta, el control de este tipo de insectos es difícil y al mismo tiempo son una fuente de infección para el operador.



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

OPERACIÓN DE LA PLANTA

OPERACIÓN DURANTE EL PERIODO VACACIONAL

En el periodo vacacional se tiene una generación nula por tres semanas consecutivas, lo que representa el reto de mantener la biomasa activa y sana, de lo contrario al regresar al periodo escolar se tendría que estabilizar el sistema nuevamente. Con el fin específico de mantener la biopelícula del sistema biológico principal de tratamiento (biodiscos) la operación en este periodo se realiza de la siguiente manera:

- (1) Se acumula la generación de agua residual del último día laboral y se mantiene en recirculación desde la unidad de biodisco. De igual manera se suspende la evacuación de lodos por lo menos cinco días laborables anteriores al periodo vacacional.
- (2) Se adopta el diagrama de flujo correspondiente a este periodo operacional sin dilución de lodos (Figura A4-17). Si existen obstrucciones por sólidos se puede usar el biodigestor para su eliminación.
- (3) Se deben monitorear mínimo los parámetros de DBO y pH para determinar el tiempo adecuado para pasar a la etapa de dilución de lodos del sedimentador primario (Figura A4-18). Este cambio se hace cuando la DBO presente valores bajos a 100 mg/L. Si existen los valores del pH se encuentran fuera del intervalo $6 < \text{pH} < 8$ se recomienda el uso de químicos para su estabilización.
- (4) Una vez que la materia orgánica del agua recirculada presenta valores bajos por medio de la DBO se recomienda la dilución al 5% de lodos del sedimentador primario en el tanque de igualación, es decir, 5 litros de lodo por 100 litros de agua. El monitoreo se debe mantener en toda la etapa.
- (5) Se mantiene el sistema de recirculación hasta terminar el periodo vacacional, el primer día hábil de operación se adopta la configuración de funcionamiento del sedimentador secundario (Figura A4-13) para comenzar con la estabilización de toda la planta.



Manual de operación
Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

OPERACIÓN DE LA PLANTA

Se deben analizar los registros del monitoreo y las experiencias para evaluar esta etapa de operación.



Manual de operación Planta de tratamiento de aguas residuales DICyG

NORMAS MEXICANAS APLICABLES

Para determinar el tipo de reúso del agua tratada se hace la comparación de las características del efluente con las emitidas por las normas correspondientes.

Una vez que se haya estabilizado la planta piloto se focaliza el proyecto en el reúso del agua tratada en los sanitarios del edificio. En esta etapa, la calidad del agua está sometida a los valores presentados en la NOM-003-SEMARNAT (Tabla A4-5) referidos al reúso en servicios al público con contacto directo.

Tabla A4-5. Límites máximos permisibles de contaminantes

TIPO DE REUSO	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes Fecales NMP/100 ml	Huevos de Helminto (h/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	1,000	≤ 5	15	30	30

Fuente: (SEMARNAT, 1998)

El monitoreo del efluente debe ser constante una vez que se tiene la posibilidad de reúso aunque no se cuenta aún con el proyecto de recirculación del agua tratada, por lo que en principio se utiliza la opción de filtración por medio de la grieta de descarga.