

01177



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

**TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS
CON PROCESOS BIOLÓGICOS MEDIANTE EL
SISTEMAS DE LAGUNAS FACULTATIVAS
OPERADAS CON AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA (AMBIENTAL)

P R E S E N T A

ING. WILSON LONDOÑO RODRÍGUEZ

DIRECTORA: DRA. Ma. TERESA ORTA LEDESMA

**UNAM
POSGRADO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO

OCTUBRE, 2004.



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.

WILSON LONDONO
RODRIGUEZ
06-10-2004
[Signature]

Jurado

- Presidente:** M en C. Constantino Gutiérrez Palacios
- Vocal:** Dra. Maria Teresa Orta Ledesma
- Secretario:** Dr. Víctor Luna Pabello
- Suplente:** Dr. Jorge De Victorica Almeida
- Suplente:** Dr. Pedro Martínez Pereda

	CONTENIDO	Página.
	LISTA DE TABLAS	iii
	LISTA DE FIGURAS	v
	RESUMEN	vii
1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	HIPÓTESIS	4
3.	OBJETIVOS	4
3.1	Objetivo general	4
3.2	Objetivos específicos	4
4.	ANTECEDENTES	5
4.1	Lixiviados de rellenos sanitarios municipales	5
4.1.1	Definición de lixiviados	5
4.1.2	Características generales de los lixiviados	5
4.1.3	Problemas al ambiente por lixiviados	7
4.1.4	Tratamiento del lixiviado	8
4.2	Lagunas facultativas (LF)	10
4.2.1	Tipos de lagunas	11
4.2.2	Características de las LF	12
4.2.3	Procesos que se desarrollan en las LF	15
4.2.4	Factores que influyen en el efluente	17
4.2.5	Carga orgánica recomendada	17
4.2.6	Materiales tóxicos	18

	Página.
5. METODOLOGÍA	19
5.1 Diagrama de flujo	19
5.2 Fases del experimento	20
5.3 Condiciones de operación del modelo	21
5.4 Análisis y caracterización de aguas residuales y lixiviados	25
5.4.1 Muestreo y caracterización para los lixiviados	25
5.4.2 Muestreo y caracterización del agua residual	33
6. RESULTADOS Y DISCUSIONES	34
6.1 Diseño del modelo	34
6.1.1 Características del prototipo	34
6.1.2 Criterios de diseño del modelo a escala	36
6.2 Estabilización del modelo	40
6.2.1 Fase I Estabilización con A.R. del lago de Texcoco	41
6.2.2 Fase II Estudio considerando A.R. de la planta de C.U.	45
6.3 Aplicación de lixiviado	49
6.3.1 Fase I Experimentación con A.R. del lago de Texcoco	49
6.3.2 Fase II Estudio considerando A.R. de la planta de C.U.	57
6.4 Compendio de resultados	66
6.4.1 Porcentaje de remoción de materia orgánica DBO ₅	66
6.4.2 Porcentaje de remoción de DQO	68
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
8. BIBLIOGRAFÍA	74
ANEXOS	77

LISTA DE TABLAS

Página.

TABLA 4.1	Composiciones típicas de un lixiviado (Qasim and Chiang, 1994), y aguas residuales domésticas (Metcalf and Eddy, 1998)	6
TABLA 5.1	Bitácora de gasto y temperatura	23
TABLA 5.2	Valores promedios para los parámetros físico – químicos de la caracterización de los lixiviados	26
TABLA 5.3	Valores de la DQO del R. S. Bordo Poniente Etapa IV para el año 2001	29
TABLA 5.4	Valores de la DBO ₅ del R. S. Bordo Poniente Etapa IV para el año 2001	31
TABLA 5.5	Valores de pH del R. S. Bordo Poniente Etapa IV para el año 2001	31
TABLA 5.6	Valores promedios para los parámetros físico – químicos del agua residual del influente del lago de Texcoco	33
TABLA 6.1	Características del prototipo (Laguna real)	35
TABLA 6.2	Variables de cálculo y dimensiones del modelo físico (Primer tanque)	39
TABLA 6.3	Variables de cálculo y dimensiones del modelo físico (Segundo tanque)	39
TABLA 6.4	Valores promedios de DBO ₅ y DQO para la etapa de estabilización del A. R. de la planta de tto del lago de Texcoco	41
TABLA 6.5	Resumen de los valores de las eficiencias de remoción para DBO ₅ y DQO para la etapa de estabilización de Texcoco	42
TABLA 6.6	Otros parámetros de control analizados en el laboratorio para la etapa de estabilización de Texcoco	43
TABLA 6.7	Valores de las eficiencias de remoción para DBO ₅ y DQO en la etapa de estabilización del A. R. de la planta de C.U.	45
TABLA 6.8	Valores promedios de DBO ₅ y DQO para la etapa de estabilización para el agua residual de la planta de C.U.	46
TABLA 6.9	Parámetros de control analizados en el laboratorio para la etapa de estabilización del agua residual de la planta de C.U.	47
TABLA 6.10	Etapas de la aplicación del lixiviado para agua residual de la planta de tratamiento del lago de Texcoco	49

TABLA 6.11	Resumen de los valores de las eficiencias de remoción para DBO ₅ y DQO para la etapa de aplicación del lixiviado para el agua residual de la planta de tratamiento del lago de Texcoco	50
TABLA 6.12	Porcentajes del incremento del flujo de lixiviado en el modelo con respecto al gasto del agua residual que se ingresa	55
TABLA 6.13	Parámetros de control medidos en el laboratorio para la etapa de aplicación de lixiviado al A. R. de la P. de T. de Texcoco	56
TABLA 6.14	Etapas de la aplicación del lixiviado para el agua residual de la planta de C.U.	57
TABLA 6.15	Valores de las eficiencias de remoción para DBO ₅ y DQO en la etapa de aplicación de lixiviado en el agua residual de C.U.	58
TABLA 6.16	Porcentajes del Incremento para DBO ₅ y DQO debido a la aplicación de lixiviado con A.R. de la planta de C. U.	63
TABLA 6.17	Parámetros de control medidos en el laboratorio para la etapa de aplicación de lixiviado al A.R. de la planta de C. U.	64
TABLA 6.18	Transformación de materia orgánica medida como DBO ₅ para el modelo y testigo, tratando A.R. de la planta de Texcoco y C.U.	66
TABLA 6.19	DQO para el modelo y testigo, tratando A.R. de la planta Texcoco y C.U.	69

LISTA DE FIGURAS

Página.

Figura 4.1 Diagrama de una laguna facultativa	13
Figura 4.2 Relación simbiótica entre algas y bacterias	14
Figura 5.1 Diagrama de flujo de la metodología	19
Figura 5.2 Diagrama del funcionamiento del modelo	21
Figura 5.3 DBO ₅ para lixiviados del relleno sanitario	27
Figura 5.4 Relación de DBO ₅ /DQO para lixiviados	27
Figura 5.5 Comparación entre DBO ₅ y DQO para lixiviados	27
Figura 5.6 Valores de DQO de Bordo Poniente Etapa IV para 2001	30
Figura 5.7 Valores de DBO ₅ del R.S. Bordo Poniente Etapa IV 2001	30
Figura 5.8 Valores de pH del R.S. Bordo Poniente Etapa IV para 2001	32
Figura 6.1 Diagrama del prototipo Laguna Facultativa de Texcoco	35
Figura 6.2 Comportamiento de DBO ₅ para la fase I aplicación de lixiviado con agua residual de la planta de tratamiento de Texcoco	51
Figura 6.3 Comportamiento de DBO ₅ para el modelo en la fase I	52
Figura 6.4 Comportamiento de DQO para la fase I aplicación de lixiviado con agua residual de la planta de tratamiento de Texcoco	53
Figura 6.5 Comportamiento de DQO para el modelo en la fase I	54
Figura 6.6 Comportamiento de DQO para el testigo en la fase I	54
Figura 6.7 Comportamiento de DQO para la fase II aplicación de lixiviado con agua residual de la planta de tratamiento de C.U.	59
Figura 6.8 Comportamiento de DQO para el testigo en la fase II	60
Figura 6.9 Comportamiento de DQO para el modelo en la fase II	60

Página.

Figura 6.10 Comportamiento de la DBO_5 en la fase II	61
Figura 6.11 Comportamiento de DBO_5 para el modelo en la fase II	62
Figura 6.12 Comportamiento de DBO_5 para el testigo en la fase II	62
Figura 6.13 Remoción de DBO_5 para el modelo en las dos fases	67
Figura 6.14 Remoción de DBO_5 para el testigo en las dos fases	68
Figura 6.15 Remoción de DQO para el modelo en las dos fases	70
Figura 6.16 Remoción de DQO para el testigo en las dos fases	70

RESUMEN

El co-tratamiento del lixiviado combinado con agua residual de una planta de tratamiento municipal existente, es un método nuevo y muy conveniente. Los requisitos son: la disponibilidad de un sistema de transporte del lixiviado hasta la planta; capacidad de la planta para asimilar el excedente (lixiviado); conocimiento de las características del lixiviado y facilidad para disponer el aumento en la producción de lodos.

El desarrollo de esta tesis se efectuó en dos fases, donde se trabajó con aguas residuales de diferentes características; en la primera fase se diseñó y construyó un modelo físico de las lagunas facultativas ubicadas en Texcoco Estado de México, el modelo operó de manera continua incorporándole agua residual del influente que ingresa a la planta de tratamiento del lago de Texcoco.

El modelo a escala al simular un proceso biológico contó con un periodo para su estabilización; una vez que el modelo se encontró estabilizado, es decir, con eficiencias de remoción constantes, se procedió a aplicar un flujo de lixiviados de manera gradual; éstos fueron traídos del relleno sanitario Bordo Poniente etapa IV. Los gastos de lixiviado aplicados fueron iguales a 2.50 %, 5.00 % y 10.0 %, con respecto al gasto de agua residual que ingresa a la planta de tratamiento.

Se determinó la capacidad de este tipo de procesos biológicos de aceptar lixiviados, sin que su funcionamiento se viera afectado. Observando los cambios sufridos por el sistema en cada etapa de aplicación y demostrando que con la incorporación de lixiviado, continuó el correcto funcionamiento del modelo, verificado a través del porcentaje de transformación de la materia orgánica y de los parámetros de control.

La segunda fase se opero de idéntica forma que la primera, solo se cambio el agua residual que se le incorporó al influente del modelo, esté es el que ingresa a la planta de tratamiento de la Ciudad Universitaria. Cada fase se implementó con cuatro tanques; los dos primeros sirvieron como testigo, operando únicamente agua residual, de la misma forma que la laguna real, mientras que en el modelo funcionaron los otros dos tanques con agua residual y lixiviado.

El parámetro de referencia que se utiliza en los procesos biológicos, fue la DBO_5 , donde se presenta la fracción que es posible degradar por los microorganismos.

Las características que se presentaron en la primera etapa para las aguas residuales, que ingresaron a la planta de tratamiento de las lagunas facultativas del lago de Texcoco se catalogaron como de concentraciones bajas, según lo mostrado para los valores de DBO_5 (50 mg/L) y DQO (247 mg/L) del influente. Mientras que para la segunda etapa se obtuvieron valores superiores de DBO_5 (200 mg/L) y DQO (234 mg/L) que representan agua residual moderadamente contaminada o típica.

Los porcentajes de remoción de materia orgánica fueron de 71% en la etapa de estabilización de la primera fase y de 86% para la segunda fase, mientras que en las etapas de aplicación de lixiviado para la primera fase se obtuvieron valores remoción de 59%, 63% y 71% respectivamente para los gastos de 2.5%, 5.0% y 10.0% y para el agua residual de Cuidad Universitaria fueron de 84%, 76% y 70%.

Uno de los resultado más importante que se obtuvo con esté trabajo fue la determinación del porcentaje de lixiviado del relleno sanitario perteneciente a Bordo Poniente Etapa IV, como gasto del caudal igual al 10%, que se podrá incorporar a un tratamiento de aguas residuales domésticas sin que este sufra una afectación en su correcto funcionamiento.

1. INTRODUCCIÓN

La ciudad de México es reflejo de las grandes megalópolis del mundo, cuenta con una alta densidad poblacional en su área metropolitana donde viven cerca de 20 millones de habitantes, los cuales deben contar con los servicios básicos necesarios; entre los que destacan el abastecimiento de agua potable, sistemas de drenaje y correcta disposición de desechos sólidos.

Para su abastecimiento el 56% del agua proviene de los acuíferos; pero la capacidad de almacenamiento de éstos se ve afectada debido a que el consumo ha superado en el doble a la recarga natural, y se observa que para el futuro habrá un grave problema por la falta de líquido en la cuenca (SMA, 1996).

En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México existen pocos lugares donde se disponen correctamente los desechos sólidos. Además no se han cuantificado los basureros a cielo abierto o sitios controlados que potencialmente pueden contaminar las aguas subterráneas debido a la infiltración de lixiviados.

Según los estudios para la Ciudad de México (Jica, 1999) se estima que cada habitante produce diariamente 1.2 kilogramo de basura, y su disposición esta distribuida de la siguiente forma: Alrededor de 11,420 toneladas diarias se confinan en el relleno sanitario Bordo Poniente etapa IV (DGSU, 2002); al relleno de Tlalnepantla 1,800 toneladas diarias (Conieco, 2002) y el resto, no tienen una correcta disposición, terminando en tiraderos a cielo abierto o sitios controlados.

Para México el relleno sanitario se presenta como una excelente opción para disponer de los desechos sólidos, lo mismo que para muchos países en desarrollo donde ha probado ser una solución ambiental económicamente factible.

El relleno sanitario debe contar con un buen diseño, construcción y operación entre lo que destaca la impermeabilización del suelo, instalación de sistemas para la captación de lixiviados y del biogás, asegurando un adecuado confinamiento de los residuos sólidos municipales.

Una de las desventajas del relleno sanitario es la producción de lixiviados. Por ser éste un líquido difícil de tratar y que representa una contaminación potencial para el ambiente. Por este motivo, se deben buscar alternativas para el tratamiento del lixiviado, teniendo en cuenta las condiciones locales, lo mismo que adelantos tecnológicos y requerimientos económicos.

En la actualidad, en México la mayoría de rellenos sanitarios no se les da tratamiento a los lixiviados, solamente una disposición en lagunas de evaporación. Solo existe una planta de tratamiento con procesos físico – químico ubicada en relleno sanitario Bordo Poniente la cual trata una parte de los lixiviados producidos 3.0 L/s (DGSU, 2002).

Se han realizado algunas investigaciones para tratar los lixiviados con procesos biológicos, como el estudio de tratabilidad de lixiviados en la planta de tratamiento de aguas residuales municipales Santa Fe, mediante lodos activados (Orta de Velásquez *et al.*, 1999).

Para Latinoamérica las condiciones son similares que en México. En los últimos años se esta realizando una recirculación de los lixiviados a las celdas. En el relleno sanitario Bordo Poniente etapa IV se realizan pruebas con recirculación en los pozos de ventilación (DGSU, 2002). Para países como Chile, Brasil y España esta recirculación se realiza haciendo un cálculo de la humedad necesaria, para que toda la materia orgánica presente en la celda sea transformada, teniendo en cuenta los factores climáticos de precipitación y llevando un control del lixiviado producido (Sánchez, 2003).

El estado del arte internacional indica que actualmente se incorpora el lixiviado a plantas de tratamiento de agua residual municipal, esta investigación se realiza a nivel de laboratorio. En cuanto a las investigaciones internacionales la información publicada acerca de tratamiento de lixiviado mediante procesos biológicos se enfoca a lodos activados (Qasim and Chiang, 1994); existe poca información respecto al empleo de lagunas.

El co-tratamiento del lixiviado combinado con agua residual de una planta de tratamiento municipal existente, es un método nuevo y muy conveniente. Los requisitos son: la disponibilidad de un sistema de transporte del lixiviado hasta la planta; capacidad de la planta para asimilar el excedente (lixiviado); conocimiento de las características del lixiviado y facilidad para disponer el aumento en la producción de lodos.

En la literatura (Qasim and Chiang, 1994; Orta de Velásquez *et al.*; 1999; DGSU, 2002 y Sánchez, 2003); se resalta que para combinar el tratamiento del lixiviado y del agua residual municipal todavía existen muchas incertidumbres acerca del funcionamiento de la planta de tratamiento. Aunque se destaca el incremento de la demanda biológica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO) y la reducción de metales pesados mediante la precipitación. Se cree que la calidad del lixiviado puede tener un impacto en el funcionamiento de la planta de tratamiento; por consiguiente se debe investigar la composición del lixiviado para cada caso.

Con base en lo anterior se propusieron la hipótesis y los objetivos para este trabajo.

2. HIPÓTESIS

El sistema de lagunas facultativas ubicado en la zona federal de Texcoco, que trata aguas residuales domésticas mediante procesos biológicos, no presenta problemas de funcionamiento debido a la aplicación de lixiviado del relleno sanitario Bordo Poniente etapa IV.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar en un modelo físico a nivel laboratorio las posibles afectaciones que pueda generar al sistema de tratamiento de aguas residuales de lagunas facultativas, la aplicación de lixiviado de un relleno sanitario.

3.2 Objetivos específicos

- ✓ Diseñar y construir un modelo que represente las características de eficiencia y remoción de una laguna facultativa existente en la zona del lago de Texcoco.
- ✓ Estabilizar el modelo, presentando condiciones similares a la laguna real para el tratamiento de agua residual en un reactor de régimen continuo.
- ✓ Determinar la capacidad de gasto a régimen continuo de lixiviado que acepte el modelo sin afectar los porcentajes de remoción del tratamiento; estudiando el efecto de la relación de flujo de lixiviados/agua residual en el funcionamiento del modelo físico.
- ✓ Valorar el mismo sistema con dos tipos de aguas residuales de características diferentes, observando el comportamiento del modelo al aplicar lixiviado en un sistema con agua residual típica.

4. ANTECEDENTES

4.1 Lixiviados de Rellenos Sanitarios Municipales

4.1.1 Definición de lixiviados

El lixiviado es un líquido percolado producido por la descomposición de la materia orgánica y por las lluvias que se infiltran en el relleno sanitario, mediante un sistema de drenaje se conduce fuera del relleno a un lugar donde se puedan tratar correctamente. Las características de este lixiviado varían dependiendo de la composición de los desechos que allí se confinan.

4.1.2 Características generales de los lixiviados

El lixiviado posee concentraciones mucho más altas de contaminantes orgánicos e inorgánicos que las aguas residuales domésticas y que algunos efluentes industriales. En la tabla 4.1 se compara una caracterización de un lixiviado (Qasim and Chiang, 1994) con la de un agua residual típica (Metcalf and Eddy, 1998). En donde se observa para el valor de la DBO_5 del lixiviado con respecto al del agua residual una relación mayor a 10 veces, teniendo en cuenta que esta es la fracción que se aprovecha en la biodegradación DBO_5/DQO .

Los lixiviados también contienen un amplio espectro de sustancias provenientes de la basura confinada en el relleno sanitario, que puedan ser tóxicas para los seres vivos, o puede alterar la ecología de una corriente superficial, debido a la presencia de elementos como el nitrógeno y el fósforo produciendo eutroficación.

Estas altas concentraciones son dañinas para un cuerpo receptor que contenga vida acuática.

TABLA 4.1 Composiciones típicas de un lixiviado (Qasim and Chiang, 1994) y aguas residuales domésticas (Metcalf and Eddy, 1998).

Parámetros (mg/L)	Lixiviado joven de relleno sanitario	Agua residual doméstica cruda
DBO ₅	7500 – 28000	220 - 400
DQO	10000 - 40000	500 - 1000
pH	5.2 – 6.4	6.0 – 8.0
SDT	10000 – 14000	500 - 850
SST	100 - 700	220 - 350
N – NH ₄	56 - 482	25 - 50
Fósforo Total	25 - 35	8 - 15
Alcalinidad (CaCO ₃)	800 - 4000	100 - 200

En un estudio (Flores, 1994), de caracterización y tratabilidad biológica por vía anaerobia de lixiviados de rellenos sanitarios; se comenta que más del 80% de la DQO, presente en los lixiviados de rellenos sanitarios jóvenes (edad 2 a 7 años), consiste de ácidos grasos volátiles, lo que indica que los procesos de hidrólisis y acidificación tienen lugar dentro del relleno sanitario, observándose que los valores de DQO pueden llegar a más de 30,000 mg/L durante este período. En cambio, en los rellenos sanitarios viejos (más de 7 años), el contenido de DQO baja a menos de 3,000 mg/L. Esto se debe a que las sustancias orgánicas originadas en el desecho son convertidas anaeróbicamente a metano y dióxido de carbono dentro del relleno sanitario, permaneciendo sólo el material orgánico poco o no biodegradable

4.1.3 Problemas al ambiente por lixiviados:

Un problema grave se presenta cuando los lixiviados se infiltran en los mantos acuíferos o aguas subterráneas. Pero la gravedad de este problema depende entre otros factores de la naturaleza; de la geología local, tipo de suelo y ubicación del relleno sanitario.

Con frecuencia, los procesos naturales remueven algunos de los contaminantes presentes en el agua residual durante el recorrido por la tierra. Sin embargo, los contaminantes de los lixiviados cuando se presentan en el agua subterránea, aunque sean concentraciones bajas, son perjudiciales, sobretodo dependiendo del uso que se vaya a dar al agua. Por ejemplo en la ciudad de México, donde es utilizada para el sistema de abastecimiento de agua potable, se debe tener mucho más cuidado puesto que el agua de los acuíferos es utilizada para surtir éste sistema de acueducto; y aunque no se tengan normas para las descargas de contaminantes en el agua subterránea, siempre se deben tratar las descargas de lixiviados y evitar que se haga una mala disposición de éstos.

En los rellenos sanitarios muchas veces se reciben materiales peligrosos / tóxicos (según criterios del CRETIB, Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico, Inflamable o Biológico), estos pueden producir lixiviados que contienen estas mismas sustancias, pero para la mayoría de rellenos sanitarios municipales incluido el de Bordo Poniente etapa IV, éstos lixiviados no se encuentran presentes en concentraciones significativas. Incluso cuando se depositan accidentalmente sustancias de origen industrial en celdas comunes; en las caracterizaciones de los rellenos sanitarios municipales no se muestran presencia de sustancias que puedan ser tenidas en cuenta por presentar una alta peligrosidad (Velasco *et al*, 2003).

De las sustancias más difíciles de tratar que se encuentra en el lixiviado es el nitrógeno, expresado como amoníaco (NH_4) esta normalmente en altas concentraciones (entre 56 a 482 mg/L), y se debe eliminar en los tratamientos o reducir por debajo de 5 mg/L antes de descargar a un cuerpo receptor; por ser un componente altamente tóxico y de una u otra forma afectará la vida de los peces.

4.1.4 Tratamiento del lixiviado:

El tratamiento de lixiviados depende del punto de descarga en el ambiente, de la ubicación geográfica y de las características individuales del relleno sanitario que los produce.

Una práctica que se utiliza antes del tratamiento, es la recirculación del lixiviado, donde éste se rocía en cada celda para darle mayor tiempo de retención dentro del relleno. En la recirculación, se usa el relleno como un digestor anaerobio, aprovechando el componente orgánico del lixiviado, el cual puede reducirse por medio de la actividad biológica dentro de la masa del desecho, dando como resultado una disminución de las concentraciones de DBO_5 , DQO, ácidos volátiles y nitrógeno amoniacal, además de una mayor producción de metano y CO_2 . (Christensen and Stegman, 1989)

En la mayoría de los casos se trata la fracción biodegradable de estos líquidos, que corresponde a la relación DBO_5/DQO . Éste se puede realizar mediante un tratamiento físico, químico y/o microbiológico (aerobio o anaerobio).

A continuación se presentan algunas características de los diferentes trenes de tratamiento; además de encontrar diferentes combinaciones de estos, dependiendo de las características individuales del lixiviado a tratar (Qasim and Chiang, 1994).

- Dilución: La dilución reduce la concentración de los contaminantes del lixiviado, mediante la mezcla con agua residual. La proporción de dilución del contaminante es proporcional a la relación de lixiviado y agua residual.
- Filtración: El lixiviado contiene partículas suspendidas que tienen una gama amplia de tamaños. La filtración es aplicable a todos los rangos de sólidos suspendidos y partículas coloidales.
- Precipitación: Las reacciones que suceden controlan los niveles de la concentración y limitan la cantidad total de contaminantes en el lixiviado. Entre los contaminantes que normalmente son de interés reducirle la concentración, encontramos los metales y más aquellos que aparecen normados.
- La adsorción y desorción: Adsorción es un proceso por el cual las moléculas se adhieren a la superficie de un material (como el carbón activado). La desorción es lo contrario de adsorción en donde las moléculas dejan la superficie; ambos procesos dependen del pH del sistema, de la naturaleza del lixiviado y de los contaminantes a tratar.
- Intercambio iónico: Procesos de permutación entre iones estructurales de un material, denominado resina iónica y iones en solución (lixiviado), la solución debe estar en contacto con el material para realizar el intercambio iónico.
- Tratamiento biológico: La descomposición biológica de los componentes orgánicos del lixiviado, se realiza mediante la actividad microbiana; la cual puede ser de tipo aerobio o anaerobio, según la disponibilidad de oxígeno molecular. Las reacciones bioquímicas son complejas, bajo las condiciones aerobias donde una parte de los componentes se convierten en materia orgánica, mientras que otra se transforma en dióxido de carbono, agua y algunos productos intermedios. Bajo las condiciones anaerobias, la materia carbonosa se descompone para producir ácidos orgánicos, anhídrido carbónico, metano, y otros compuestos orgánicos. La desnitrificación y reducción de metales son otras reacciones bioquímicas de la actividad

anaerobia. En general, la actividad microbiológica convierte los compuestos orgánicos e inorgánicos en masa celular, además de la precipitación de compuestos inorgánicos y también la solubilización de metales por diferentes reacciones de la reducción, bajo condiciones ácidas.

Para tratar el lixiviado lo más usual es que se realice *in situ*, por uno de los métodos antes descritos, aunque una manera de reducir las concentraciones de los lixiviados consiste en diluirlos mediante la adición a aguas residuales domésticas, sin embargo aun así deberá buscarse un procedimiento adecuado para su disposición final.

Las investigaciones a nivel mundial se presentan desde los años ochenta, pero para Latinoamérica estas aplicaciones son relativamente nuevas, siendo los países más avanzados en el estudio de tratamiento de lixiviados Brasil, Chile y España (Sánchez, 2003).

4.2 Lagunas facultativas (LF).

El tratamiento de aguas residuales mediante sistemas de lagunaje se cataloga dentro de los procesos biológicos. Una clasificación dentro de las lagunas existentes se muestra a continuación (Mendoza, 1990).

Es de anotar que para el diseño y construcción de cualquier tipo de tratamiento de agua residual, se debe realizar un estudio detallado de las características del agua, lo mismo que la topografía del lugar seleccionado y normas ambientales que se deban tener en cuenta al descargar un efluente.

4.2.1 Tipos de lagunas

- Lagunas aerobias: Son muy poco profundas, por lo general varían de 0.3 a 0.5 metros, aprovechando el intercambio de oxígeno con la atmósfera.
- Lagunas anaerobias: Con más de 3.0 metros de profundidad, son utilizadas para tratar caudales con una alta carga orgánica, deben ser ubicadas lejos de unidades urbanas, puesto que casi siempre hay producción de olores.
- Lagunas facultativas: Llamadas así por que tienen una zona aerobia superficial, una zona facultativa intermedia y una zona anaerobia en el fondo. Son el tipo más usado en el tratamiento de aguas residuales municipales.
- Lagunas de maduración: tienen la principal finalidad de reducir los coliformes fecales (CF) contenidos en los desechos de las aguas residuales. Se construyen siempre, después del tratamiento completo, por medio de una laguna facultativa primaria o secundaria o de una planta de tratamiento convencional. Con adecuado dimensionamiento pueden conseguirse remociones de coliformes fecales mayores que 99%. Tienen profundidades menores que las lagunas facultativas, variando de 0.6 a 1.5 metros. El área máxima no debe ser mayor a 2.0 hectáreas.

Ventajas de los sistemas de lagunas:

- Bajo costo.
- Necesitan poco o ningún componente importado.
- Nulo consumo energético.
- Simples de construir y de operar.
- Confiables y fáciles de mantener.
- Pueden absorber aumentos bruscos de cargas hidráulicas u orgánicas.
- Posibilidad de uso como sistemas reguladores para riego.

- Fácil adaptación a variaciones estacionales.
- Posibilidad de tratar vertimientos industriales fácilmente biodegradables (mataderos o rastros, lecherías, industrias de frutas, etc.)
- Elevada estabilización de la materia orgánica.
- Producen un efluente de alta calidad, con excelente reducción de microorganismos patógenos.

La mayor desventaja de las lagunas es que requieren más terreno que cualquier otro tipo de tratamiento para aguas residuales.

4.2.2 Características de las lagunas facultativas:

Generales:

- ❖ Son una excelente opción de tratamiento de aguas residuales, puesto que son relativamente baratas en su construcción y son altamente eficientes en la remoción de contaminantes.
- ❖ Estanques de dimensiones específicas, diseñados para el tratamiento biológico de las aguas residuales por un proceso natural de purificación bioquímica.
- ❖ De estructura sencilla de tierra, en una depresión topográfica natural, o excavada a propósito, constituida principalmente de materiales térreos impermeables o se impermeabiliza con materiales sintéticos.
- ❖ Abiertas al sol y al aire para que puedan cumplir su misión depuradora.

Específicas: (ver figura 4.1)

Tiempo de retención hidráulica (entre 5 --20 días)

Profundidad para asegurar su identidad de facultativa entre 1.2 – 2.5 metros (con áreas relativamente grandes). La profundidad mínima de las lagunas facultativas primarias debe ser igual a 1.5 metros.

El área máxima de las lagunas facultativas no debe exceder de 15 hectáreas. Funcionan a través de la acción de algas y bacterias, con la influencia de la luz solar y de la fotosíntesis.

La materia orgánica contenida en los desechos se estabiliza, en parte transformándose en productos inorgánicos finales que salen con el efluente.



Figura 4.1 Diagrama de una laguna facultativa

Características biológicas:

Se aprovecha la simbiosis existente entre las algas y las bacterias que realizan un intercambio de CO_2 y materia orgánica.

Las bacterias descomponen la materia orgánica, formando nitrógeno inorgánico NH_3 , fosfatos PO_4 , y dióxido de carbono CO_2 . Las algas usan éstos compuestos, junto con la energía de la luz solar, para la fotosíntesis, liberando oxígeno para la solución. El oxígeno es, a su vez, asimilado por las

bacterias, cerrando así el ciclo. El efluente de una laguna facultativa contiene algas suspendidas, y el exceso de los productos finales de la composición bacteriana.

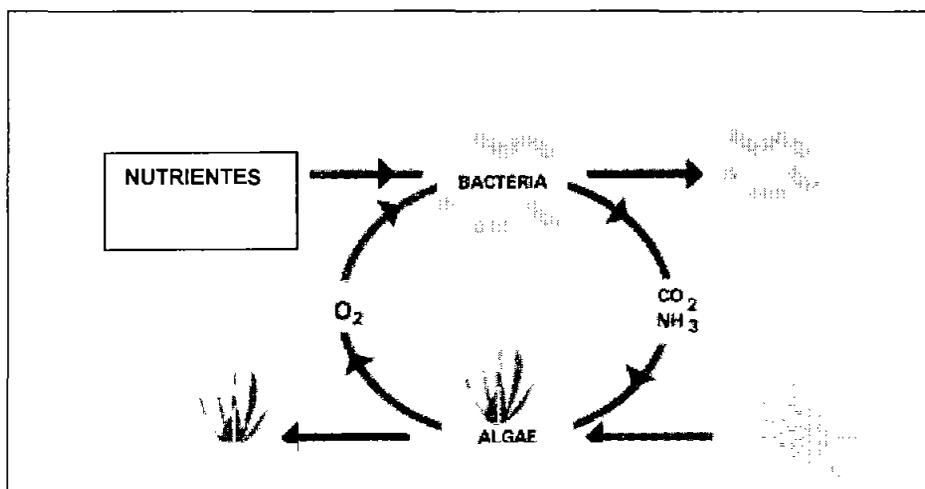


Figura 4.2 Relación simbiótica entre algas y bacterias.

La producción óptima de oxígeno para algunas especies de algas en las lagunas facultativas se obtiene entre 20 y 25°C, sus valores límite superior e inferior, respectivamente son de 37 y 4°C; sin embargo, se sabe de temperaturas más altas que pueden tolerar y algunas especies de algas ya fueron observadas creciendo normalmente debajo de una capa de hielo.

A partir de temperaturas próximas a 35°C, la actividad fotosintética de las algas decrece. Las *Clorofitas* (algas verdes) tienden a disminuir o desaparecer y las *Euglenofitas* (euglenas) pasan a predominar. Por encima de los 35°C, prevalecen las *Cianofitas* (algas azules) y particularmente las *Oscillatorias*. Además, es probable que lagunas con temperaturas más altas sean más sensibles a choques hidráulicos o a repentinos aumentos de carga orgánica, con la consecuente menor eficiencia en la reducción de DBO₅.

La actividad bacteriana se torna más intensa en temperaturas más altas, en las cuales el oxígeno disuelto es usado a una mayor tasa. Si la cantidad de oxígeno solicitado no se compensa por una producción más alta de oxígeno, las condiciones

anaerobias pueden prevalecer y el efluente puede tornarse turbio, y aparecer malos olores (Darley, 1987).

4.2.3 Procesos que se desarrollan normalmente en una laguna facultativa:

Oxidación progresiva de la materia orgánica en condiciones aeróbicas.

Reaeración superficial.

Descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas.

Eliminación de patógenos.

Las sustancias degradables se estabilizan por la acción de bacterias aeróbicas y anaeróbicas.

En la superficie, por el día: aumento del oxígeno por la acción de fotosíntesis de las algas.

En el fondo, los lodos sedimentados sufren una descomposición anaeróbica, con desprendimiento de metano y otros gases.

En el funcionamiento de las lagunas facultativas influyen diversos factores, entre los que sobresalen los de tipo físico y químico, éstos son:

Físicos:

1. Temperatura: Cuando es mayor de 30 °C la actividad de las algas decrece, las bacterias consumen más oxígeno y hay mayor producción de gases en el fondo.
2. Iluminación: Las algas utilizan entre 2- 9 % de la luz solar.
3. Vientos: Favorecen el intercambio de oxígeno en la superficie.
4. Infiltración y evaporación: Si son grandes, el nivel de la laguna baja y se ve afectada la calidad del efluente (se afecta la actividad de las algas y bacterias).

Químicos:

1. Nutrientes: Tanto las bacterias como las algas necesitan de una fuente de nutrientes para crecer y multiplicarse. Varios elementos son necesarios; por ejemplo, el carbono, el nitrógeno y el fósforo se requieren en mayor cantidad. Las aguas residuales domésticas contienen todos los nutrientes necesarios para mantener una comunidad de bacterias y algas. Cuando la materia orgánica es suficiente para un óptimo crecimiento bacteriano, automáticamente también es adecuado para que haya un desarrollo de una población de algas.

El contenido de carbono/nitrógeno/fósforo en un agua residual doméstica es del orden de 114:37:1, mientras que para el desarrollo y reproducción de algas esa razón es de 106:15:1. Para las bacterias aerobias, una relación aproximada de DBO/nitrógeno/fósforo está cerca de 100:5:1.

2. Oxígeno disuelto (OD): Es el mejor indicador de una operación satisfactoria en una laguna facultativa. La principal fuente de OD, utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica y en sus funciones respiratorias, proviene del oxígeno producido por la acción fotosintética de las algas. Sin embargo, la concentración de oxígeno disuelto puede caer a menos de 1 mg/L durante la madrugada.
3. pH: Las lagunas facultativas son operadas en forma eficiente con valores de pH ligeramente alcalinos. Los desechos líquidos industriales con valores extremos del pH tendrán que pasar por tanques de neutralización para corregir el pH, antes de entrar a la laguna.

En el caso de las lagunas facultativas, cuando el color de la laguna se presenta verde oscuro, el valor del pH probablemente será alcalino. Si el color es verde-amarillo o pálido, indica con certeza que se ha iniciado el proceso de acidificación.

El pH de una laguna facultativa varía a lo largo del día en las diferentes capas de la masa líquida, prevaleciendo valores más elevados en la superficie (Unam, 1966).

4.2.4 Factores que influyen sobre la calidad del efluente:

Según la visión de sectores como:

Salud: número de microorganismos patógenos o indicadores.

Medio ambiente: principales indicadores de la contaminación, es decir, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y los sólidos suspendidos (SS).

Reuso: dependiendo del uso que se dará al efluente, se definirán los criterios para la reducción de DBO_5 , SS y bacteriológica.

4.2.5 carga orgánica superficial:

Según la Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental, de la Secretaría del Medio Ambiente del gobierno de Sao Paulo (CETESB, 1989), es muy importante el establecimiento de la máxima carga orgánica superficial, para que queden aseguradas las dos condiciones esenciales:

La operación se presente sin desprendimiento de malos olores. Para lograrlo, la demanda de oxígeno solicitada por las bacterias no debe exceder la capacidad de reoxigenación resultante de la fotosíntesis y de la reaireación superficial.

La calidad del efluente, obtenida en una primera laguna será la máxima, ya que ello determina el tamaño de la siguiente laguna. Es decir, cuanto menos eficiente sea la

remoción de DBO_5 en la laguna primaria, mayor será el tamaño de una o de las demás lagunas siguientes.

Cargas orgánicas superficiales para lagunas facultativas ($\text{Kg DBO}_5/\text{ha-día}$)

Recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (Schulz y Okun, 1990):

Climas tropicales 200 a 400

20 a 25°C 200 a 250

25 a 30°C 250 a 400

4.2.6 Materiales tóxicos

Los materiales tóxicos como metales pesados, plaguicidas, desinfectantes, sulfitos, desechos líquidos de industrias de antibióticos y otros residuos industriales contenidos en el influente de las lagunas, deben eliminarse inicialmente, o de lo contrario producirá daño letal al proceso biológico, además debe haber una notificación del problema al órgano oficial de control del medio ambiente.

5. METODOLOGÍA

5.1 Diagrama de flujo. En la figura 5.1 se resume la metodología utilizada durante toda la experimentación.

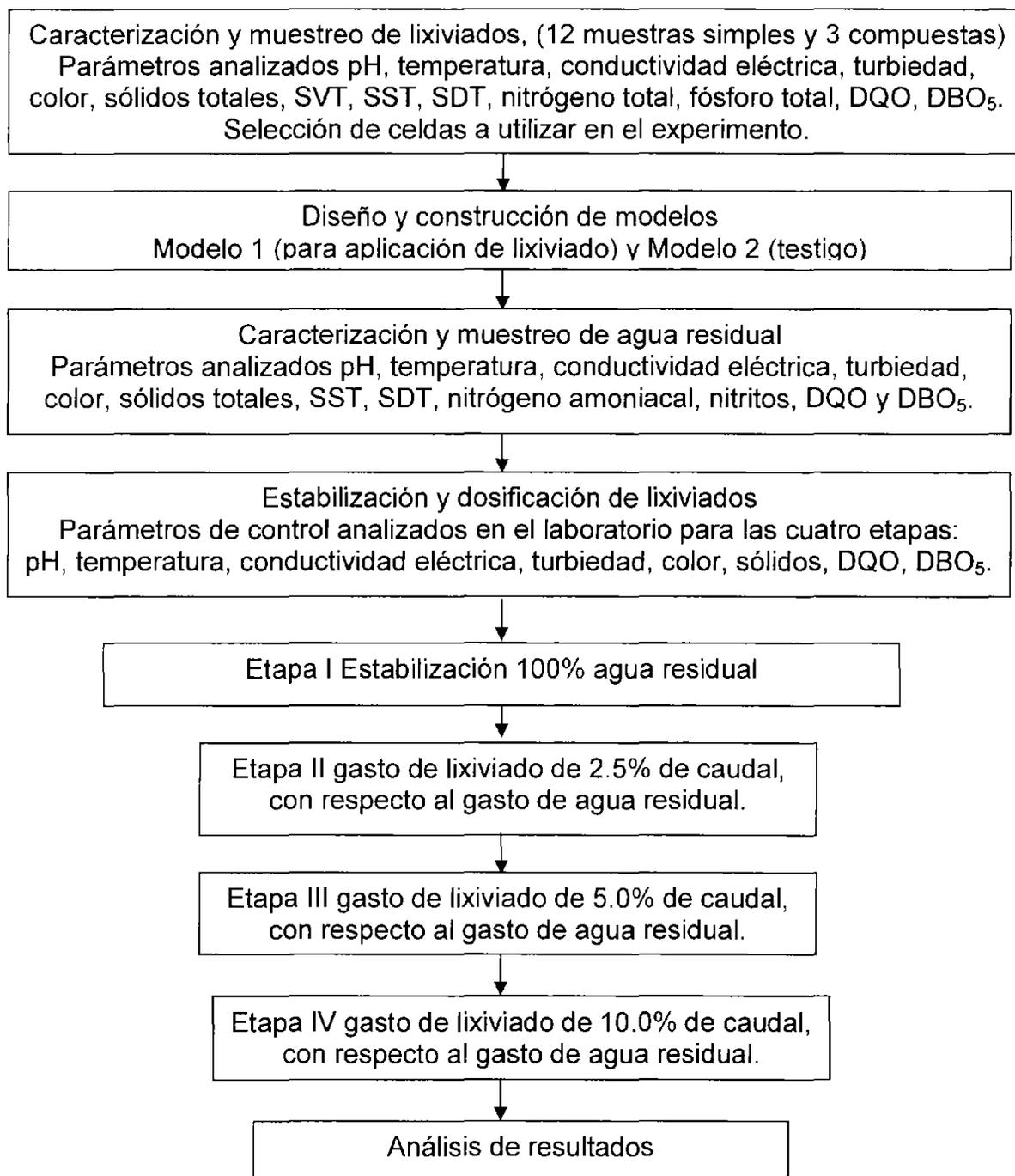


Figura 5.1 Diagrama de flujo de la metodología

5.2 Fases del experimento:

Primera fase (Fase I):

5.2.1 Durante esta fase se diseñó y construyó un modelo físico con base en la constante de biodegradabilidad de la laguna facultativa existente y de las concentraciones de materia orgánica influente, medida como DBO_5 .

5.2.2 El modelo operó, incorporándole agua residual del influente que ingresa a la planta de tratamiento del lago de Texcoco; y fue ubicado en el Instituto de Ingeniería.

5.2.3 El modelo al simular un proceso biológico; contó con un periodo para su estabilización y acondicionamiento de los microorganismos del agua residual; éste se estabilizó cuando la eficiencia de remoción medida como DBO_5 y DQO se mantuvo constante.

5.2.4 Después se aplicó paulatinamente los lixiviados para no desestabilizar el modelo. Los lixiviados fueron traídos del relleno sanitario Bordo poniente etapa IV; analizando las características físico – químicas de éste.

Segunda fase (Fase II):

Dentro de esta fase el modelo opero dentro de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Ciudad Universitaria; esto con el propósito de conocer los efectos que pudieran producir al utilizar agua residual de composición diferentes a las originalmente utilizadas en la primera fase.

Durante estas dos fases se opero de manera simultánea un modelo como testigo, el cual funciono exclusivamente con aguas residuales domésticas; en la figura 5.2 se presenta un diagrama del funcionamiento del modelo y del testigo.

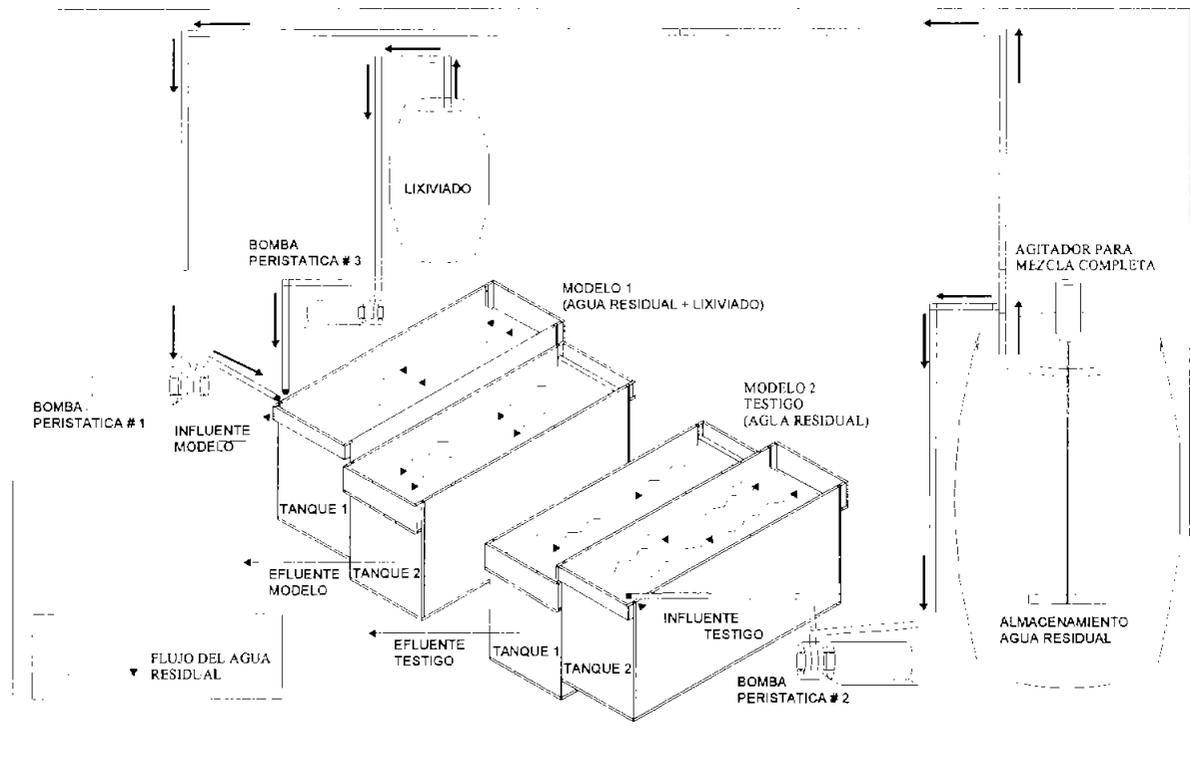


Figura 5.2 Diagrama del funcionamiento del modelo

5.3 Condiciones de operación del modelo:

Las algas y el lodo para los modelos:

Fueron traídos de la planta de tratamiento de aguas residuales del Lago de Texcoco para arrancar los reactores, y de esta forma el periodo de estabilización fue más corto, puesto que se contaba con las mismas condiciones que la laguna real.

Alimentación:

El modelo físico fue alimentado con aguas residuales provenientes de la planta de tratamiento, (planta de Texcoco para la primera fase y planta de C.U. para la segunda).

Se alimentó con lo mismo cada modelo, 64 L/d (44.0 mL/min) y el agua residual fue transportada de la planta de tratamiento hasta la sitio del modelo.

Monitoreo:

Para hacer un monitoreo adecuado del modelo físico durante su funcionamiento, se analizaron las variables más importantes del proceso como son DBO₅, DQO, concentración de oxígeno, pH, temperatura, conductividad, sólidos disueltos totales, turbiedad y ortofosfatos, además del análisis de diferentes parámetros para cada una de las etapas requeridas como fue la aplicación de lixiviado.

Etapas de Muestreo:

Para cada una de las etapas se contó con un tiempo de supervisión de 15 días o dos semanas, la primera para adaptarse a las nuevas condiciones y la segunda para realizar análisis detallados de laboratorio.

Control del gasto y temperatura:

Se realizó un control diario del gasto de agua residual y lixiviado, para de esta forma vigilar el caudal a tratar; registrando el gasto de entrada en la mañana y en la tarde, cuando se presentaban cambios importantes se corregían graduando el gasto para que fuera uniforme durante el transcurso del tiempo. Los datos fueron registrados en una bitácora para el modelo (reactor 1), testigo (reactor 2), el lixiviado y tanque de alimentación. Como se ilustra en la tabla 5.1.

TABLA 5.1 Bitácora de gasto y temperatura

FECHA	Reactor # 1				Reactor # 2				Lixiviado	Tambo
Hora	Tiempo	Volumen	Gasto	Temp	Tiempo	Volumen	Gasto	Temp	Gasto	Temperatura
Inicio/final.	(min)	(mL)	(mL/min)	(°C)	(min)	(mL)	(mL/min)	(°C)	(mL/min)	(°C)
29-May 10:00 a.m.										
Inicial	2.40	100	37.5							
Final	2.40	100	40.0							

Toma de muestras para laboratorio:

Las muestras se tomaron tanto en el modelo como en el testigo en los siguientes puntos:

- Efluente del Modelo
- Efluente del testigo
- Influyente de la mezcla: Agua residual más lixiviado; a partir de la fecha de estabilización del modelo
- Influyente solo: Agua residual, como testigo para control.
- Lixiviado: Cada inicio de etapa; cambio del gasto o de un nuevo lixiviado del relleno sanitario.

Muestreo y caracterización

Se analizaron los datos proporcionados por DGSU para los lixiviados del relleno sanitario Bordo Poniente etapa IV, además por parte de CNA las caracterización del agua residual que ingresa a la Laguna Facultativa de Texcoco.

Por parte del Instituto de Ingeniería de la Unam se realizó un muestreo y caracterización de los lixiviados que fueron utilizados durante la experimentación. Mientras para el agua residual que se utilizó, se realizaron análisis de laboratorio durante todo el proyecto.

Aplicación de lixiviados:

Una vez que el modelo se encontró estabilizado, es decir, con las eficiencias de remoción constantes, entonces se procedió a aplicar un flujo de lixiviados provenientes de la etapa IV del relleno sanitario Bordo Poniente. Estos lixiviados fueron aplicados al tanque que simula la primera laguna, para observar qué comportamiento tiene en general todo el proceso.

Preparación del Lixiviado

Se hicieron mezclas de lixiviados de celdas viejas con celdas nuevas, estableciendo las mejores condiciones para la incorporación del lixiviado y lo más cercano a la realidad.

Esto se hizo puesto que las mezclas aseguran:

1. Que los lixiviados de las celdas viejas no sean agresivos al tratamiento biológico, por contar con sustancias recalcitrantes.
2. Que las celdas nuevas incorporen una carga demasiado alta al proceso.

(La preparación del lixiviado se realizó cada vez que se dio por concluida una etapa).

Los porcentajes de aplicación de lixiviados fueron escogidos teniendo en cuenta publicaciones internacionales sobre el tema (5.0% del gasto), además de la experiencia del grupo en tratamiento biológico (10% del gasto) e informes de la DGSU.

Cronograma de aplicación de lixiviado:

❖	Estabilización	1 mes
❖	Análisis de laboratorio	15 días
❖	Aplicación de lixiviado	
	2.50 % del gasto	15 días
	5.00 % del gasto	15 días
	10.0 % del gasto	15 días

La aplicación del porcentaje de lixiviado se incremento considerando el resultado de la eficiencia de remoción obtenido en la etapa anterior, y los valores estipulados en la metodología.

5.4. Análisis y caracterización de aguas residuales y lixiviados**5.4.1 Muestreo y caracterización de los lixiviados**

Pertenecientes al relleno sanitario Bordo Poniente Etapa IV, que se estudiaron para ingresar al experimento de lagunas facultativas.

- Se realizó un muestreo de 6 celdas en el relleno sanitario, donde se presentarán celdas viejas (1, 2 y 4) y celdas jóvenes (3, 6 y 7) Ver anexo 1.
- En cada celda se muestrearon dos puntos, el primero en la canaleta perimetral y el segundo en un pozo de ventilación según su disponibilidad. Identificándose como macro celda 1, canaleta perimetral (M1-I) y macro celda 1, pozo de ventilación (M1 – II).

- Se tomaron dos muestras sencillas para cada celda, además de tres muestras compuestas, muestra compuesta 1 para todas las celdas (MC – 1), muestra compuesta 2 para las celdas viejas (MC – II) y muestra compuesta 3 para las celdas jóvenes (MC – III)

Según las figuras 5.3, 5.4 y 5.5. Los resultados de la caracterización mostraron la tendencia de la DQO y la DBO₅ para los lixiviados del relleno sanitario, tanto para celdas viejas, nuevas y la combinación de éstas. Presentándose los valores más altos en las celdas nuevas, mientras que en las celdas viejas se dan valores más bajos, ya que los lixiviados están estabilizados.

El parámetro de referencia que se utiliza en los procesos biológicos, es la DBO₅, donde se presenta la fracción DBO₅/DQO que es posible degradar por los microorganismos (ver figura 5.4), en la figura 5.3 se muestra el máximo valor en la M6 – II (2866 mg/L), mientras que el mínimo esta en M2 – 1 (88 mg/L), estas muestras se utilizaron para la mezcla que se aplico al modelo con diferentes regímenes.

TABLA 5.2 Valores promedios para los parámetros físico – químicos de la caracterización de los lixiviados.

PARÁMETROS	UNIDADES	VALOR MÁX	VALOR MÍN	VALOR PROMEDIO*
pH		8.3	7.7	7.9
Temperatura	°C	15	13	14
Conductividad Eléctrica	µmhos /cm	19600	12400	16840
Turbiedad	NTU	521.00	35.00	223.53
Color	UPtCo U.C.	17,500.00	2,562.50	8,887.50
STT	mg/L	19,160	12,000	15,580
SVT	mg/L	4,950	1,800	3,000
SST	mg/L	440	70	160
SDT	mg/L	19,020	11,850	16,490
Nitrógeno Total	mg/L	657.72	124.32	245.10
Fósforo total	mg/L	0.11	0.06	0.08
D.Q.O.	mg O ₂ /L	11,078	2,135	5,763
D.B.O ₅	mg/L	2,866	88	875

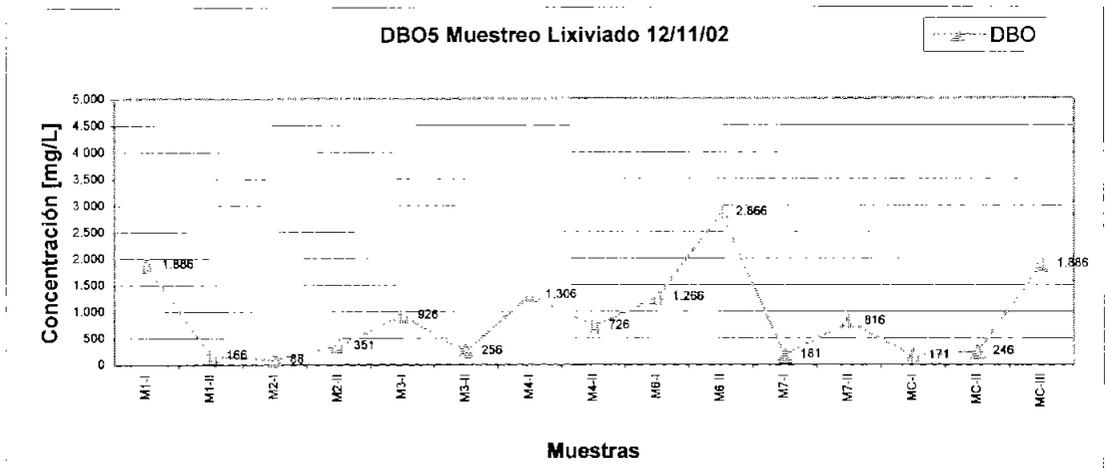


Figura 5.3 DBO₅ para lixiviados del relleno sanitario

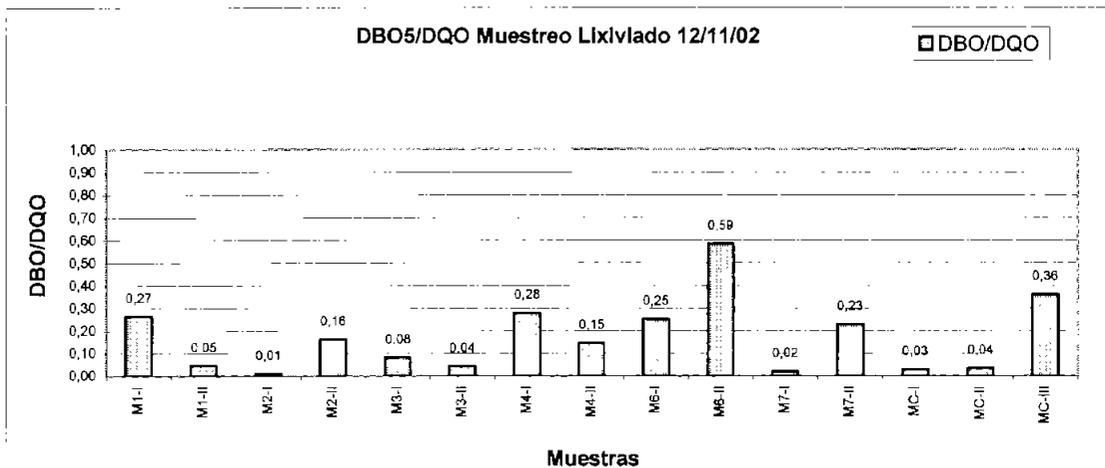


Figura 5.4 Relación de DBO₅/DQO para lixiviados

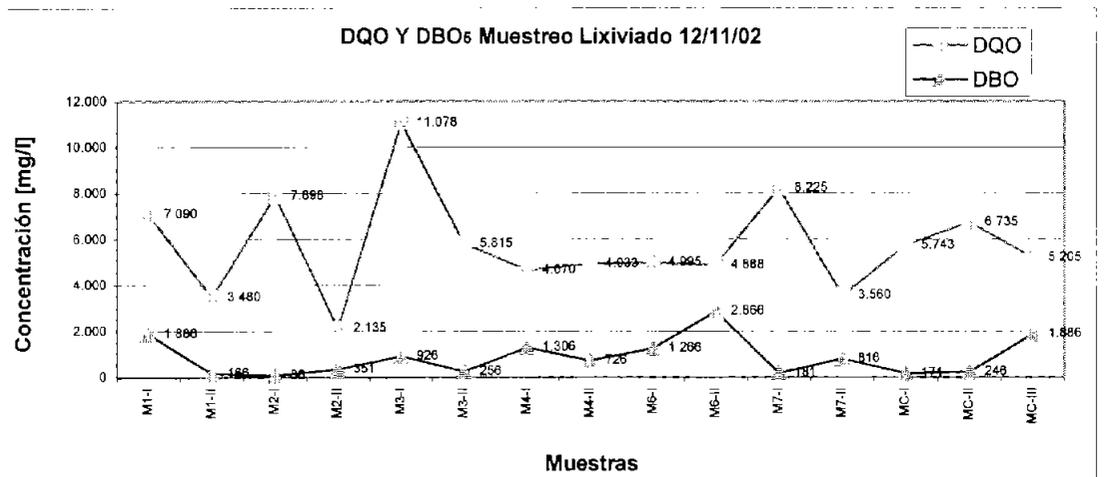


Figura 5.5 Comparación entre DBO₅ y DQO para lixiviados

Para la caracterización de los lixiviados mostrada en la tabla 5.2, vemos que entre los parámetros que se destacan, tenemos el pH con valores ligeramente alcalinos. Para la turbiedad y el color se observan valores altos con respecto a los que se reportan en la literatura (ver tabla 4.1), además de presentar un color café intenso.

Los sólidos totales ST son valores altos y en su mayoría pertenecen a los sólidos disueltos totales SDT, su origen se debe al tipo de suelo presente en el relleno sanitario.

El nitrógeno total se presenta con valores arriba que el promedio presentado en caracterizaciones anteriores, mientras que los valores para fósforo total son bajos comparados a los resultados obtenidos en literatura (ver tabla 4.1).

Para la concentración de DBO_5 con valores en el intervalo de 3000 mg/L a 28000 mg/L, pertenecen a un lixiviado joven entre 1 a 5 años. Estos valores aportan materia orgánica al agua residual que por efecto de la dilución se ven reducidos.

Caracterización de los lixiviados durante 2001.

A continuación se presentaran los resultados de los análisis de laboratorio para el muestreo mensual que realizó la DGSU en el relleno sanitario Bordo Poniente Etapa IV durante 2001 (ver anexo 1 y 2), esta caracterización se realiza en la cuarta etapa, en las macroceldas que estuvieron en funcionamiento y de acuerdo a las necesidades de la dirección técnica de la entidad. Haciendo énfasis en algunos parámetros de control de interés para nuestro experimento.

En las graficas 5.6, 5.7 y 5.8. Se ve la concentración del lixiviado para cada mes del 2001. La información se analizo durante un año presentando información acerca de época de lluvias y época de estiaje (ver anexo 2).

a) Demanda Química de Oxígeno (DQO):

Los valores para DQO representan concentraciones típicas para los lixiviados, tanto para lixiviados jóvenes y viejos (ya estabilizados), el promedio es de 5532 mg/L, con valores máximos de 16229 mg/L y mínimos de 391 mg/L, la mayor parte de los valores se encuentran en un rango entre 4000 y 9000 mg/L.

TABLA 5.3 Valores de la DQO del lixiviado del Relleno Sanitario Bordo Poniente Etapa IV 2001

Meses	mc1	mc2ce	mc2cw	mc3	mc4	mc6	mc7cn	mc7cw
Enero	2403,18	2502,48	2462,76	12969,21	4846,07	6216,48	3972,19	4468,72
Febrero	2027,64	2967,73	2746,53	15244,19	4405,52	6857,12	4350,22	4534,55
Marzo	2399,31	3239,07	13761,78	16229,65	4644,39	6838,05	4524,42	4387,32
Abril	2372,18	2065,43	*	*	*	*	*	*
Mayo	1957,29	1637	9181,46	8398,54	4199,27	7236,03	6441,25	4928,81
Junio	883,35	2536,8	7611,33	11141,69	8761,13	6183,45	9246,96	7180,05
Julio	976,14	*	*	*	*	*	*	*
Agosto	903,1	884,29	6622,75	7356,52	8587,05	7821,32	6891,51	6545,12
Septiembre	819,36	391,06	2681,56	6499,05	4208,55	4599,61	5400,36	7653,61
Octubre	5014,07	1446	5408,43	7248,8	4957,73	4413,13	5352,09	5802,8
Noviembre	*	*	2073,69	9237,34	*	6649,51	6992,27	10197,06
Diciembre	*	4852,64	2534,38	9017,66	2750,48	6758,33	6777,98	10039,27
Valor máx.	5014,07	4852,64	13761,78	16229,65	8761,13	7821,32	9246,96	10197,06
Valor min.	819,36	391,06	2073,69	6499,05	2750,48	4413,13	3972,19	4387,32
PROMEDIO	1975,562	2252,25	5508,467	10334,27	5262,243	6357,303	5994,925	6573,731

* No se tienen registro

b) Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅):

Las concentraciones de DBO₅ se encuentran con valores promedios de 1234 mg/L, máximos de 6416 mg/L, mínimos de 33 mg/L. Encontrándose la mayor parte de resultados entre 500 mg/L y 1500 mg/L. Estos valores se presentan como importantes pues se tendrán en cuenta en el balance de masa con los del agua residual doméstica para ingresar en el modelo.

En la grafica 5.7, se observa la distribución y variación de la concentración de la DBO₅ durante el año, teniendo presente que en los puntos analizados se encuentran tanto celdas viejas como celdas nuevas.

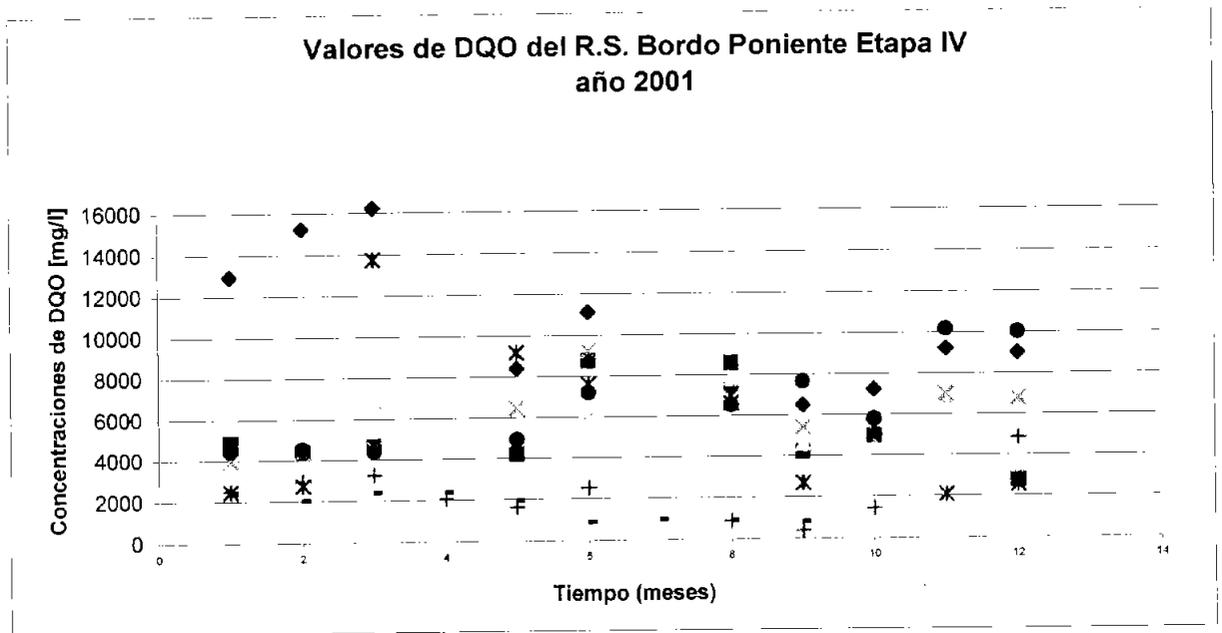


Figura 5.6 Valores de la DQO del lixiviado del Relleno Sanitario Bordo Poniente Etapa IV 2001

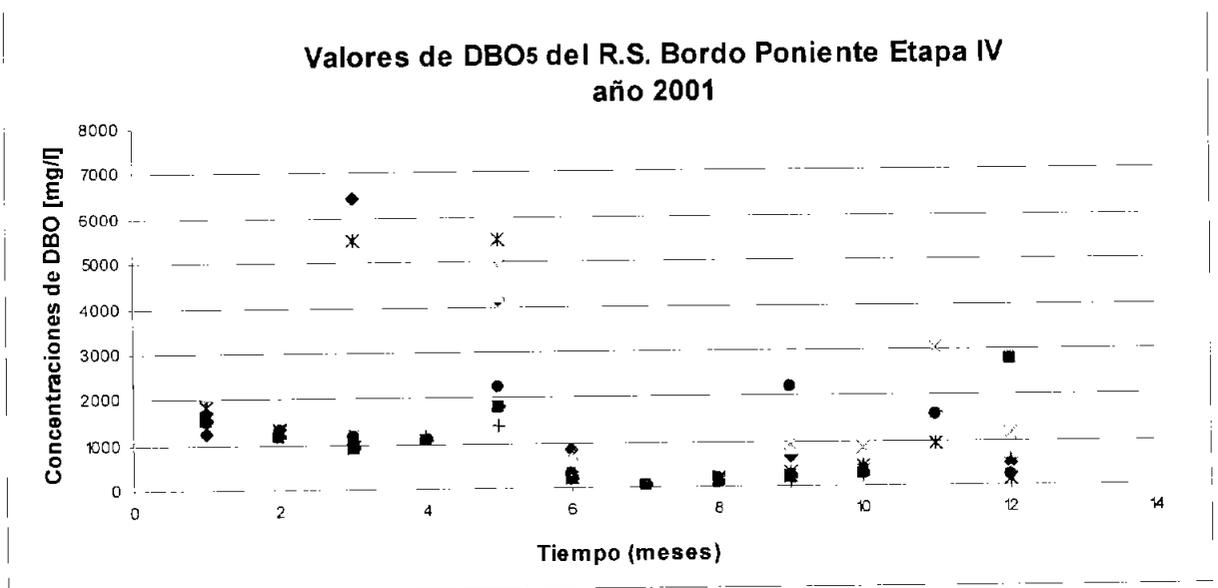


Figura 5.7 Valores de DBO₅ del lixiviado perteneciente al Relleno Sanitario Bordo Poniente Etapa IV 2001

TABLA 5.4 Valores de la DBO₅ del lixiviado del Relleno Sanitario Bordo Poniente Etapa IV para el año 2001

Meses	mc1	mc2Ce	mc2cw	mc3	mc4	mc6	mc7cn	mc7cw
Enero	1528,1	1734,28	1816,61	1245,07	1528,1	2060,38	1840,53	1665,47
Febrero	1168,83	1194,59	1323,85	1349,3	1168,83	1238,89	1275,81	1176,08
Marzo	898,79	1082,1	5501,08	6416,36	898,79	1560,57	1227,88	1139,75
Abril	1068,87	1151,35	*	*	1068,87	*	*	*
Mayo	1786,02	1368,3	5476,88	4152,36	1786,02	4223,52	4896,42	2249,1
Junio	199,71	275,91	239,03	865,82	199,71	584,76	780,032	303,27
Julio	33,53	*	*	*	33,53	*	*	*
Agosto	75,92	135,07	195,68	275,72	75,92	300,06	237,88	178,61
Septiembre	228,61	89,46	296,71	666,92	228,61	830,47	944,89	2176,37
Octubre	256,57	206,09	434,98	504,14	256,57	621,67	840,51	305,42
Noviembre	*	*	954,97	1618,34	*	1719,9	3036,58	1579,06
Diciembre		586,46	139,33	474,55	2750,48	290,85	1143,39	221,59
Valor máx.	1786,02	1734,28	5501,08	6416,36	2750,48	4223,52	4896,42	2249,1
Valor min.	33,53	89,46	139,33	275,72	33,53	290,85	237,88	178,61
PROMEDIO	724,495	782,361	1637,912	1756,858	908,6755	1343,107	1622,392	1099,472

* No se tienen registro

TABLA 5.5 Valores de pH del lixiviado perteneciente al Relleno Sanitario Bordo Poniente Etapa IV para el año 2001

Meses	mc1	mc2Ce	mc2cw	mc3	mc4	mc6	mc7cn	mc7cw
Enero	8,89	9,03	9,52	9,24	8,98	9,05	8,8	9,39
Febrero	9,06	9,34	9,58	9,27	9,19	9,23	9,08	9,59
Marzo	9,05	9	8,73	8,63	9,08	9,16	8,85	9,47
Abril	9,06	9,2						
Mayo	8,98	9	8,66	8,56	8,97	8,68	8,79	9,32
Junio	9,18	9,15	8,78	8,75	9,15	8,98	8,86	9,29
Julio	8,14							
Agosto	8,48	8,63	8,31	8,16	8,26	8,14	8,26	8,39
Septiembre	8,07	7,92	7,83	7,8	8,1	8,02	7,94	8,12
Octubre	8,61	8,84	7,99	8,31	8,31	8,21	8,02	8,43
Noviembre			8,74	7,83		8,48	8,27	8,45
Diciembre		8,48	8,79	8,12	8,4	8,26	8,28	8,37
Valor máx.	9,18	9,34	9,58	9,27	9,19	9,23	9,08	9,59
Valor min.	8,07	7,92	7,83	7,8	8,1	8,02	7,94	8,12
PROMEDIO	8,75	8,86	8,69	8,47	8,72	8,62	8,52	8,88

* No se tienen registro

c) pH:

Los valores de pH para el lixiviado presentan valores ligeramente alcalinos; con un valor promedio de 8.7, un máximo de 9.6 y un mínimo de 7.8.

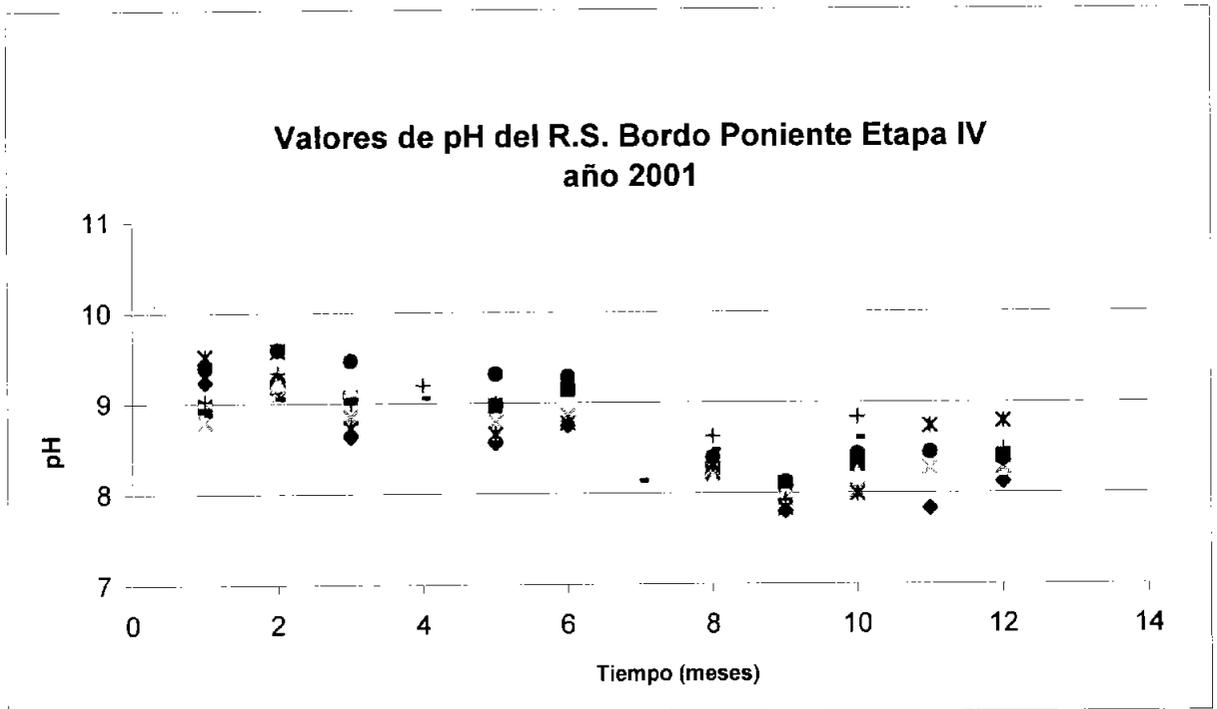


Figura 5.8 Valores de pH del lixiviado perteneciente al relleno sanitario Bordo Poniente Etapa IV 2001

5.4.2 Muestreo y caracterización del agua residual

TABLA 5.6 Valores promedios para los parámetros físico – químicos de la caracterización del agua residual del influente de la planta de tratamiento de aguas residuales del lago de Texcoco

Parámetros	Unidades	Valor máx	Valor mín	Valor promedio
pH	-	8.2	7.7	8.0
Temperatura	°C	20.00	18.40	19.33
Conductividad Eléctrica	mS/cm	2.38	2.12	2.29
Turbiedad	UNT	226.00	127.00	165.00
Color	U.C.	627.00	3323.00	427.00
STT	mg/L	1,630	1,460	1,530
SST	mg/L	210	50	110
SDT	mg/L	1170	950	1,090
Nitrógeno Amoniacal.	mg/L	-	-	50 *
Nitratos	mg/L	-	-	12 *
DQO Total	mg O ₂ /L	318	296	307

* Valor único

Realizando una comparación con agua residual doméstica típica (MOP 8, 1998) tenemos:

En la tabla 5.6, vemos como la demanda química de oxígeno (DQO) pertenece a agua residual poco contaminada o diluida, pues su concentración es baja, debido al recorrido hecho por canales hasta la planta de tratamiento.

Pero posee una alta contaminación por sólidos totales STT, sólidos suspendidos totales SST, sólidos disueltos totales SDT y nitrógeno amoniacal.

El pH se presenta ligeramente alcalino.

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1 Diseño del modelo

En la Ingeniería ambiental, el término *modelo* corresponde a un sistema que simula un objeto real llamado prototipo, mediante la entrada de cierta información que se precisa y se presenta en forma adecuada para emplearse en el diseño y operación de obras de Ingeniería, por ello un modelo físico a escala reducida representa a un objeto real o prototipo, tal como un fenómeno, una estructura o máquina que cumple con ciertas condiciones matemáticas definidas.

Para modelar las lagunas utilizamos la similitud química, simulando sus constantes de biodegradación, lo cual implica que las relaciones entre las concentraciones en dos puntos cualquiera del prototipo sean iguales que la relación de concentraciones en los dos puntos homólogos del modelo físico a escala (Yáñez, 1983).

6.1.1 Características del prototipo

El sistema de lagunas facultativas en la zona del lago de Texcoco se compone de dos módulos, cada uno compuesto por dos lagunas primarias operadas en paralelo (L-1 y L-2), de las cuales se pasa a una laguna facultativa secundaria(L-3), ver figura 6.1. El influente realiza un recorrido de un kilómetro por un canal rectangular hasta el carcomo de bombeo, para luego ser introducido a las laguna.

Cada módulo recibe en promedio un gasto de 250 L/s, con una calidad de DBO_5 que oscila entre 220 mg/L en época de estiaje a 115 mg/L en época de lluvias, con un promedio de 185 mg/L.

El efluente de cada módulo tiene como promedio el valor de 11 mg/L de DBO_5 .

Comisión Nacional del Agua (CNA, 1998)

TABLA 6.1 Características del prototipo (Laguna real)

Gasto (L/s)	250
DBO ₅ Influyente (mg/L) Promedio	185
DBO ₅ Influyente (mg/L) Estiaje	220
DBO ₅ Influyente (mg/L) Lluvias	115
DBO ₅ Efluente (mg/L)	11

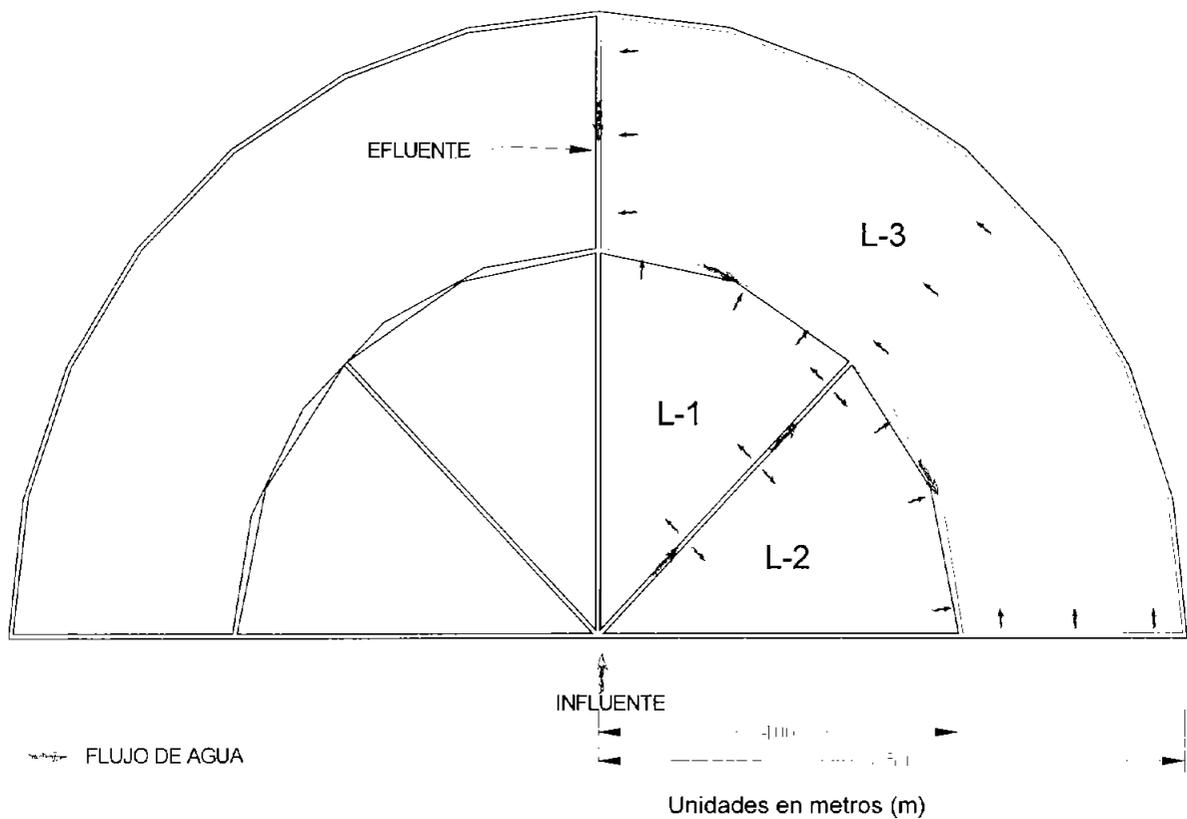


Figura 6.1 Diagrama del prototipo Laguna Facultativa de Texcoco

6.1.2 Criterios de diseño del modelo

Las variables de mayor importancia para una laguna facultativa son: el régimen de flujo, características fisicoquímicas del agua, temperatura, oxígeno disuelto y luz solar.

Debido a que las lagunas facultativas como tratamiento de aguas residuales tiene una mayor remoción de contaminantes utilizando un flujo pistón, es decir mejor comportamiento hidráulico y de sus constantes cinéticas (Masters, 1991), tomando en cuenta esto, es muy conveniente que el modelo funcione con un flujo uniforme y laminar, ya que el ancho pequeño del modelo, las paredes lisas y su poca exposición al viento, permitirán que las fuerzas ocasionadas por la viscosidad del agua sean las predominantes (flujo convectivo), provocando un flujo laminar.

Para poder simular los dos componentes de un módulo (L-1 o L-2 y L-3) del sistema lagunar facultativo existente en el Lago de Texcoco (ver figura 6.1), se construyeron dos tanques de 240 litros de capacidad cada uno, con una relación Largo – Ancho de 3:1, recomendados para modelos a escala, dando como resultado un mejor funcionamiento (Masters, 1991).

Una de las primeras variables que fue necesario determinar, es el gasto a utilizar en el modelo, para ello, fue necesario obtener la constante de degradación de la laguna prototipo, dicha constante está definida como:

$$K_p = \frac{S_i - S_e}{S_e \theta_p} \quad (\text{Ecuación 6.1})$$

(Metcalf and Eddy, 1998)

Donde;

- K_p : Constante de biodegradación del prototipo (d^{-1})
 S_i : Concentración de DBO_5 a la entrada (mg/L)
 S_e : Concentración de DBO_5 a la salida (mg/L)
 θ_p : Tiempo de retención hidráulica del prototipo (d)

Con los datos de diseño obtenidos de CNA calculamos la constante de biodegradación de la laguna real (ver figura 6.1).

Primera Laguna (L-1 o L-2)

$$\underline{S_i = 185 \text{ mg/L}}$$

$$\underline{S_e = 34 \text{ mg/L}}$$

$$\underline{\theta_p = 10 \text{ d}}$$

Segunda Laguna (L-3)

$$\underline{S_i = 34 \text{ mg/L}}$$

$$\underline{S_e = 11 \text{ mg/L}}$$

$$\underline{\theta_p = 7 \text{ d}}$$

Entonces, se tiene una $K_{p1} = 0.44 \text{ d}^{-1}$

$K_{p2} = 0.30 \text{ d}^{-1}$

De donde $K_p = K$ (la constante de biodegradación del modelo va a ser igual a la constante de la laguna real)

Ecuación para flujo pistón

$$\frac{S_e}{S_i} = e^{-\theta_m K} \quad \text{(Ecuación 6.2)}$$

Resolviendo, el tiempo de retención hidráulica del modelo es:

$$\theta_m = \frac{\ln\left(\frac{S_e}{S_i}\right)}{-K} \quad (\text{Ecuación 6.3})$$

Con los valores anteriores se obtiene el tiempo del modelo:

Primer Tanque

$$\theta_m = 3.85 \text{ d}$$

Segundo Tanque

$$\theta_m = 3.76 \text{ d}$$

Con este tiempo de retención hidráulica en cada fase del modelo, además del volumen de cada tanque que es de 240 L, se tiene el gasto de la siguiente forma:

$$Q_m = \frac{V_m}{\theta_m} \quad (\text{Ecuación 6.4})$$

Primer tanque

$$Q_m = 43.3 \text{ mL/min}$$

Segundo tanque

$$Q_m = 44.3 \text{ mL/min}$$

GASTO PROMEDIO: Para los dos tanques el gasto será de **44.0 mL/min**

TABLA 6.2 Variables de cálculo y dimensiones del modelo físico
(Primer tanque).

VARIABLE	SÍMBOLO	CANTIDAD	UNIDAD
DBO ₅ de entrada	S _i	185	mg/L
DBO ₅ de salida	S _e	34	mg/L
Tiempo de retención	θ_p	10	d
Constante de degradación	K _p	0.44	d ⁻¹
Tiempo de retención del modelo	θ_m	3.85	d
Volumen	V _m	0.24	m ³
Gasto del modelo	Q _m	44.0	mL/min
Profundidad	H _m	0.5	m
Ancho	W	0.4	m
Largo	L _m	1.2	m

TABLA 6.3 Variables de cálculo y dimensiones del modelo físico
(Segundo tanque).

VARIABLE	SÍMBOLO	CANTIDAD	UNIDAD
DBO ₅ de entrada	S _i	34	mg/L
DBO ₅ de salida	S _e	11	mg/L
Tiempo de retención	θ_p	7	D
Constante de degradación	K _p	0.30	d ⁻¹
Tiempo de retención del modelo	θ_m	3.76	D
Volumen	V _m	0.24	m ³
Gasto del modelo	Q _m	44.0	mL/min
Profundidad	H _m	0.5	m
Ancho	W	0.4	m
Largo	L _m	1.2	m

6.2 Estabilización del modelo.

Se contó con un mes para que el modelo fuera estabilizado y después de ese tiempo, funcionara con la misma eficiencia con la que trabaja el sistema de lagunas facultativas ubicadas en el Lago de Texcoco.

EL parámetro más importante que se analiza para un tratamiento biológico como es la laguna facultativa es la demanda biológica de oxígeno DBO_5 , pero ésta requiere cinco días para obtener el resultado, entonces es recomendable realizar un seguimiento más exhaustivo con la demanda química de oxígeno DQO.

Cálculo de eficiencias:

$$\text{Eficiencia} = \frac{(\text{DBO}_5 \text{ Influyente} - \text{DBO}_5 \text{ Efluente})}{\text{DBO}_5 \text{ Influyente}} * 100 \quad (\text{Ecuación 6.5})$$

Para la laguna real $\text{Eficiencia} = \frac{(185 - 11)}{185} * 100 = 94 \%$

La eficiencia de remoción de 94 % para los valores de diseño del prototipo, se encuentran entre los valores reportados de eficiencia en la literatura para lagunas facultativas que están entre 75 y 95 % (Yáñez, 1983).

6.2.1 Estabilización del modelo con el agua residual que ingresa a la planta de tratamiento del lago de Texcoco.

TABLA 6.4 Valores promedios de DBO₅ y DQO para la etapa de estabilización del el agua residual de la planta de tratamiento del lago de Texcoco.

Muestra	DBO₅	DQO
Influente	45	247
Efluente modelo	13	177
Efluente testigo	9	183

Las características que se presentan en la tabla 6.4 para las aguas residuales que ingresan a la planta de tratamiento de las lagunas facultativas del lago de Texcoco fueron catalogadas como de concentraciones bajas (Metcalf and Eddy, 1998), según lo mostrado para los valores de DBO₅ y DQO del influente.

Cálculo del porcentaje de remoción obtenido para:

DBO₅ :

$$\text{Modelo:} \quad E_f = \frac{(45 - 13)}{45} * 100 = 71 \%$$

$$\text{Testigo:} \quad E_f = \frac{(45 - 9)}{45} * 100 = 80 \%$$

DQO:

$$\text{Modelo:} \quad \text{Ef} = \frac{(247 - 177)}{247} * 100 = 28 \%$$

$$\text{Testigo:} \quad \text{Ef} = \frac{(247 - 183)}{247} * 100 = 26 \%$$

TABLA 6.5 Resumen de los valores de las eficiencias de remoción para DBO₅ y DQO para la etapa de estabilización del agua residual de la planta de tratamiento del lago de Texcoco.

Eficiencia	DBO₅	DQO
Modelo	71	28
Testigo	80	26

Los valores obtenidos para la remoción de DBO₅ nos representan la estabilización de nuestros modelos; aunque los valores de las eficiencias de remoción para DQO son bajos, esto se atribuye a las características que presentan las concentraciones de DQO presente en el agua residual suministrada.

Culminando la etapa de estabilización se dio inicio a la siguiente etapa que es la aplicación de lixiviados al modelo.

Otros parámetros de control analizados en el laboratorio

Según los resultados obtenidos en el laboratorio y cuyos valores promedios se representan en la tabla 6.6.

TABLA 6.6 Otros parámetros de control analizados en el laboratorio para la etapa de estabilización del agua residual de Texcoco.

Parámetro	Influyente	Efluente Modelo	Efluente Testigo	Diferencia entre efluentes
pH	8.0	8.1	8.2	0.1
Temperatura (°C)	19	19	19	0
Oxígeno Disuelto (mg/L)	-	1.2-2.0 superficie	1.0-1.8 superficie	0.2
	-	0.6-1.0 fondo	0.4-0.8 fondo	0.2
Conductividad eléctrica (µmhos/cm)	2300	2100	1800	300
DQO	247	177	183	6
Nitrógeno amoniacal	50	-	-	-
SDT (mg/L)	1200	1000	900	100
Coliformes fecales (UFC/100mL)	4X10 ⁴	2X10 ³	3X10 ³	1X10 ³
Ortofosfatos (mg/L)	40	36	36	0

Como se observa en la tabla 6.6 existe una diferencia natural entre las características de los efluentes del modelo y el testigo; esta variación es importante ya que ambos poseen las mismas dimensiones, además de compartir el mismo influente para la etapa de estabilización.

El pH no tuvo una variación significativa y sus valores se encontraron entre 8.0 y 8.2, la característica de pH básico representan un buen desarrollo para los procesos biológicos dentro de la laguna facultativa.

La temperatura afecta el desarrollo de los procesos que ocurren en la laguna, teniendo una relación directa con la actividad biológica microbiana, viéndose afectado su funcionamiento con las temperaturas extremas; mientras el rango de mejor desempeño ocurre en el intervalo de 15 a 30° C. También se debe considerar que existe una variación de temperatura durante el día, lo mismo que en el transcurso del año. Las mediciones reportadas en la tabla 6.6 se tomaron alrededor de las diez de mañana dando valores promedios de 19°C.

El oxígeno disuelto es de suma importancia para el tratamiento del agua residual por procesos biológicos en una laguna facultativa y se presenta en la relación existente entre las bacterias aerobias y algas; además de la reairección superficial. Por consiguiente es importante revisar que las condiciones sean favorables y la laguna conserve su identidad de facultativa. Como lo vemos en la tabla 6.6, donde la concentración de oxígeno en superficie se mantuvo entre 1.0 y 2.0 mg/L, mientras en el fondo permaneció entre 0.4 y 1.0 mg/L.

Para la conductividad eléctrica se obtuvieron valores altos comparados con los valores de un agua residual típica, lo mismo que para los sólidos disueltos totales SDT, puesto que estos tienen una estrecha relación; entre mayor cantidad de SDT, mayor es la capacidad del conducir una corriente eléctrica por el agua.

Hay una eliminación de coliformes fecales de una unidad logarítmica llevándola de 4×10^4 a 3×10^3 , siendo una remoción alta para este tipo de procesos biológicos, como lo son las lagunas Facultativas (Romero, 1999).

En el caso de la concentración de ortofosfatos no se observó una remoción de forma significativa, esto se debe que la única transformación que se presenta es la que se necesita para el funcionamiento de los microorganismos. Para eliminar un mayor

porcentaje de fósforo en los procesos biológicos se deben tener las condiciones ambientales adecuadas, esto se consigue mediante la ubicación de reactores secuenciales; uno de los trenes de tratamiento propuesto es: anaerobio, anóxico, aerobio, anóxico y aerobio (MOP 8, 1998).

6.2.2 Fase II Estudio del modelo considerando agua residual de la planta de tratamiento de la ciudad universitaria C.U.

En esta etapa del experimento también se llevo a cabo un seguimiento del comportamiento de cada tanque del modelo.

TABLA 6.7 Valores de las eficiencias de remoción para DBO_5 y DQO en la etapa de estabilización del agua residual de la planta de C.U.

Eficiencia	DBO_5	DQO
Modelo	86	64
Testigo	88	67

Según los valores de la Tabla 6.7 se presentan muy buenos porcentajes en la transformación de materia orgánica en esta segunda fase donde se trabajo con agua residual de la planta de tratamiento de C.U. La remoción presenta valores superiores a los de la fase anterior, dadas las características del agua residual que presenta un valor alto de materia orgánica biodegradable.

Los valores obtenidos para DBO_5 y DQO representan agua residual moderadamente contaminada o típica (Metcalf and Eddy, 1998), y en comparación a la etapa de estabilización de la fase I, son valores superiores.

TABLA 6.8 Valores promedios de DBO_5 y DQO para la etapa de estabilización para el agua residual de la planta de C.U.

Muestra	DBO_5	DQO
Influente	208	234
Efluente final modelo	30	84
Efluente final testigo	26	77
Efluente intermedio modelo	76	154
Efluente intermedio testigo	71	165

Para los valores promedios de los parámetros de control reportados en la tabla 6.9.

El pH presenta condiciones alcalinas, las cuales representan un correcto funcionamiento del modelo y del testigo, los valores oscilan entre 7.93 y 8.11.

La temperatura se mantuvo constante durante la experimentación, con valores promedios de 20° C.

TABLA 6.9 Parámetros de control analizados en el laboratorio para la etapa de estabilización del agua residual de la planta de C.U.

Parámetro	Influente	Efluente Final Modelo	Efluente Final Testigo	Efluente Intermedio Modelo	Efluente Intermedio Testigo
pH	7.93	8.32	8.28	8.06	8.11
Temperatura (°C)	20	20	20	20	20
Oxígeno Disuelto (mg/L)	-	1.5-2.3 (superficie)	1.5-2.9 (superficie)	1.0-2.7 (superficie)	1.0-3.0 (superficie)
	-	0.5-1.0 (fondo)	0.4-0.8 (fondo)	0.5-0.9 (fondo)	0.4-0.6 (fondo)
Conductividad eléctrica (μ mhos/cm)	810	940	860	860	940
SDT (mg/L)	390	480	430	440	480
Turbiedad (NTU)	120	22	30	47	52
Ortofosfatos (mg/L)	30	21	21	26	27

De la tabla 6.9 se obtienen los valores promedios de los parámetros de control.

Para los valores del oxígeno disuelto en la superficie se tuvo un aumento en comparación a los de la fase de estabilización con agua residual de planta de Texcoco, puesto que presenta una mejor aireación y su variación se encuentra entre 1.0 y 3.0 mg/L, también es importante tener en cuenta la hora, los valores más bajos se presentan en horas de la mañana durante días nublados, mientras los valores más altos se presentaron hacia el medio día, durante días soleados; lo mismo sucedió con los valores para el fondo del modelo estos están entre 0.4 y 1.0 mg/L. Es importante observar también que en esta fase se presentaron valores que aseguran la identidad de laguna facultativa del modelo.

La conductividad eléctrica vario entre 810 y 940 $\mu\text{mhos/cm}$, y los sólidos disueltos totales entre 390 y 480 mg/L; ésto nos presenta un agua residual moderadamente contaminada. Además no se observa una remoción de estos contaminantes por parte del modelo.

Los valores para la turbiedad fueron en el influente de 120 NTU y para los efluentes de 22 y 30 NTU respectivamente para el modelo y el testigo, lo cuál indicó una remoción de turbiedad del 82 % para el modelo y de 75 % para el testigo.

La turbiedad y la coloración existen en el efluente se deben a la presencia de algas.

En lo que concierne a la remoción de los ortofosfatos, esta fue 30 %, remoción que resultó ser mayor a la obtenida en la etapa de anterior (estabilización). Esta situación puede atribuirse al incremento de los microorganismos, los cuales requieren de ortofosfatos para sus funciones metabólicas.

6.3 Aplicación de lixiviado para los diferentes gastos con aguas residuales de la planta de Texcoco (fase I) y de la planta de C.U. (fase II).

6.3.1 Fase I Experimentación con el agua residual que ingresa a la planta de tratamiento del lago de Texcoco.

TABLA 6.10 Etapas de la aplicación del lixiviado para agua residual de la planta de tratamiento del lago de Texcoco.

<p align="center">ETAPA EXPERIMENTAL II</p> <p align="center">2.5 %</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mezcla de lixiviados Macrocelda 2 (estabilizado) y Macrocelda 6 (joven). ▪ Gasto de agua residual 38 mL/min. ▪ Gasto de lixiviado 1.5 mL/min.
<p align="center">ETAPA EXPERIMENTAL III</p> <p align="center">5 %</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mezcla de lixiviados Macrocelda 2 (estabilizado) y Macrocelda 6 (joven). ▪ Gasto de agua residual 37.3 mL/min. ▪ Gasto de lixiviado 2.2 mL/min.
<p align="center">ETAPA EXPERIMENTAL IV</p> <p align="center">10 %</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mezcla de lixiviados Macrocelda 2 (estabilizado) y Macrocelda 8 (joven). ▪ Gasto de agua residual 35.7 mL/min. ▪ Gasto de lixiviado 3.8 mL/min.

Se trabajo con las bombas peristálticas para que la suma de los gastos del agua residual y lixiviado diera como resultado un caudal constante igual a 40 mL/min, para cada una de las etapas.

TABLA 6.11 Resumen de los valores de las eficiencias de remoción para DBO₅ y DQO para la etapa de aplicación del lixiviado para el agua residual de la planta de tratamiento del lago de Texcoco.

GASTO DE LIXIVIADO M2 + M6	MUESTRA	DBO₅	REMOCIÓN	DQO	REMOCIÓN
2.5%	Influente Modelo	52 mg/L	59 %	461 mg/L	46 %
	Efluente Modelo	21 mg/L		251 mg/L	
	Influente Testigo	45 mg/L	68 %	247 mg/L	31 %
	Efluente Testigo	14 mg/L		170 mg/L	
	Influente Modelo	65 mg/L	63 %	514 mg/L	31 %
	Efluente Modelo	24 mg/L		353 mg/L	
5.0%	Influente Testigo	45 mg/L	67 %	204 mg/L	34 %
	Efluente Testigo	15 mg/L		134 mg/L	
	Influente Modelo	90 mg/L	71 %	672 mg/L	37 %
	Efluente Modelo	26 mg/L		425 mg/L	
	Influente Testigo	50 mg/L	70 %	206 mg/L	35 %
	Efluente Testigo	15 mg/L		134 mg/L	

Se aplicó lixiviado proveniente del relleno sanitario Bordo Poniente etapa IV, de las macroceldas dos (M2) y seis (M6), al modelo que simula el tratamiento de agua residual. Según lo visto en la sección 5.5.1 (Muestreo y caracterización para los lixiviados).

Los valores promedio de la eficiencia de remoción se presentan en la tabla 6.11. Esta remoción presentada por el modelo para las etapas de aplicación de Lixiviado, denota que el modelo no se vio afectado; la transformación de materia orgánica varió entre 59 % y 71 %, conservando una buena remoción para un proceso biológico como son las lagunas facultativas.

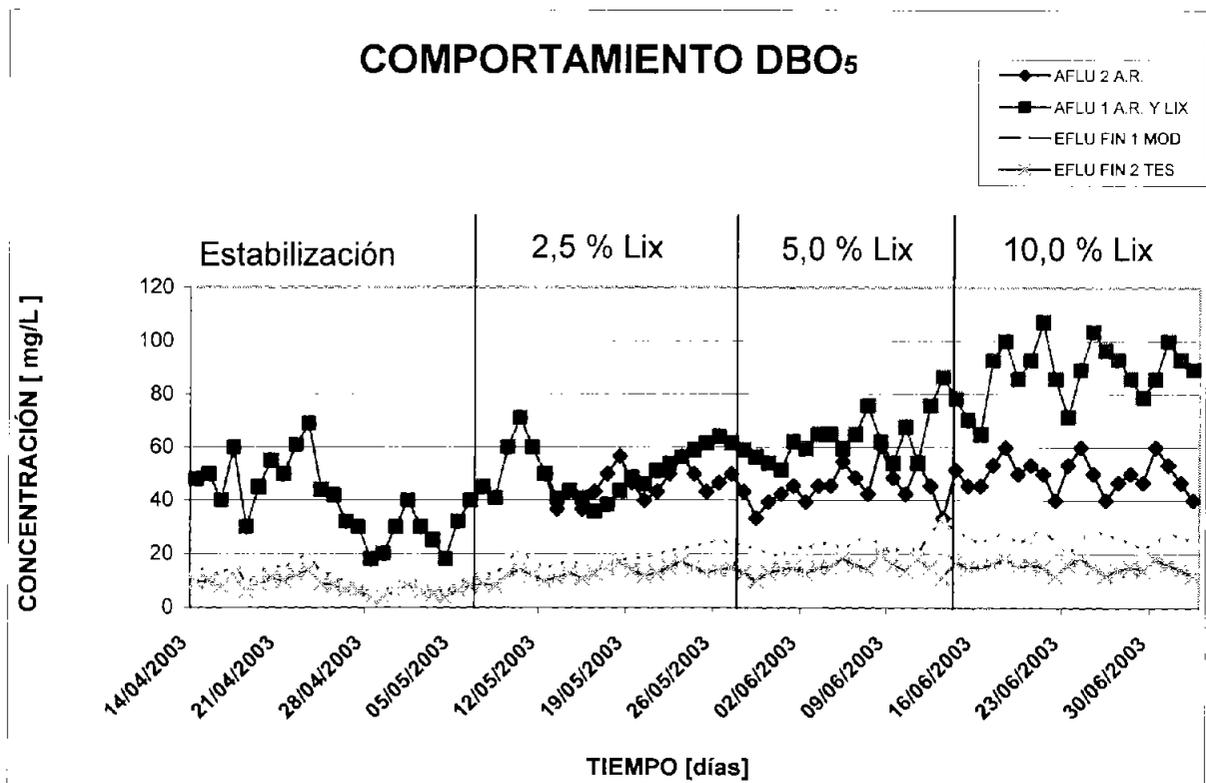


Figura 6.2 Comportamiento de DBO₅ para la fase I aplicación de lixiviado con agua residual de la planta de tratamiento de Texcoco

En términos generales se observó un buen comportamiento del modelo al aplicarle un gasto de lixiviado, también se aprecia como al cambiarle las condiciones al sistema, éste se ve afectado disminuyendo la eficiencia de remoción; requiriendo de un tiempo para adaptarse al nuevo ambiente.

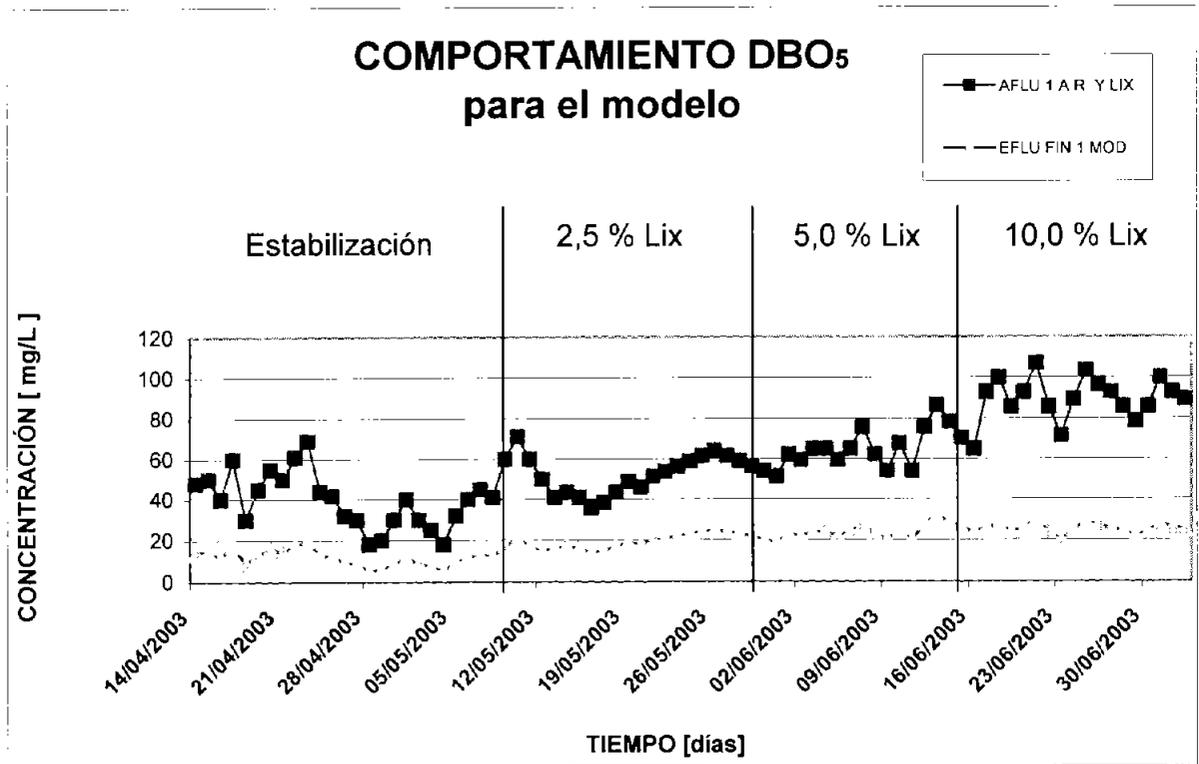


Figura 6.3 Comportamiento de DBO₅ para el modelo en la fase I (A. R. de Texcoco)

Se dieron incrementos en la DBO₅ de 15 %, 44 % y 80 %, para los gastos de 2.5%, 5 % y 10 % respectivamente; como se ve en la tabla 6.12, es de hacer notar que los incrementos se dan de forma escalonada y son favorables para el sistema como se vio en el mejoramiento de los porcentajes de remoción.

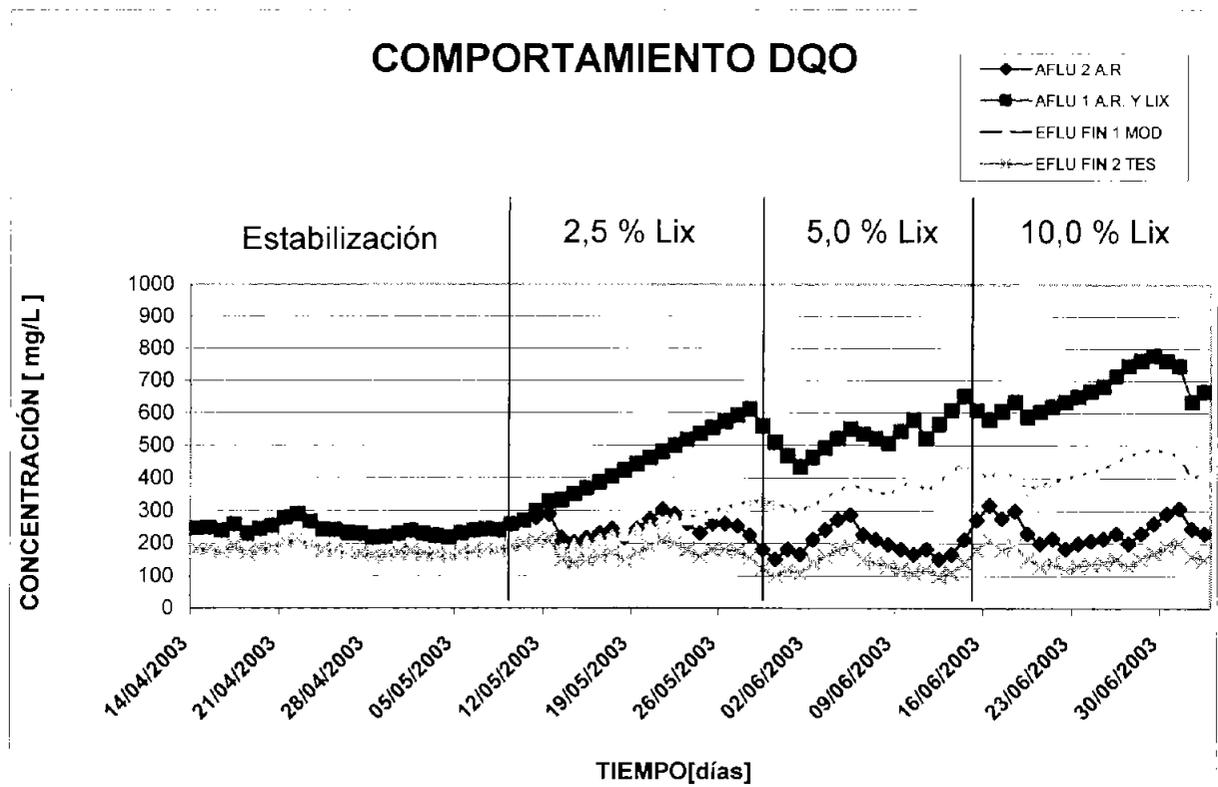


Figura 6.4 Comportamiento de DQO para la fase I aplicación de lixiviado con agua residual de la planta de tratamiento de Texcoco

La remoción de DQO no varió mucho puesto que se encuentra entre 31%, y 46 %, mejorando las condiciones presentadas en la etapa de estabilización como se muestra en la tabla 6.11.

Estos porcentajes de remoción para DQO reflejan el acondicionamiento de los microorganismos al sustrato del agua residual y lixiviado, ésta adaptación se logra con el transcurso del tiempo.

Lo cual se debe a que el aporte por parte de los lixiviados para la DQO se ve reflejada en los incrementos obteniéndose valores mucho más altos de 87%, 152% y 226 % respectivamente para los gastos de lixiviado de 2.5%, 5.0% y 10.0 % (ver tabla 6.12).

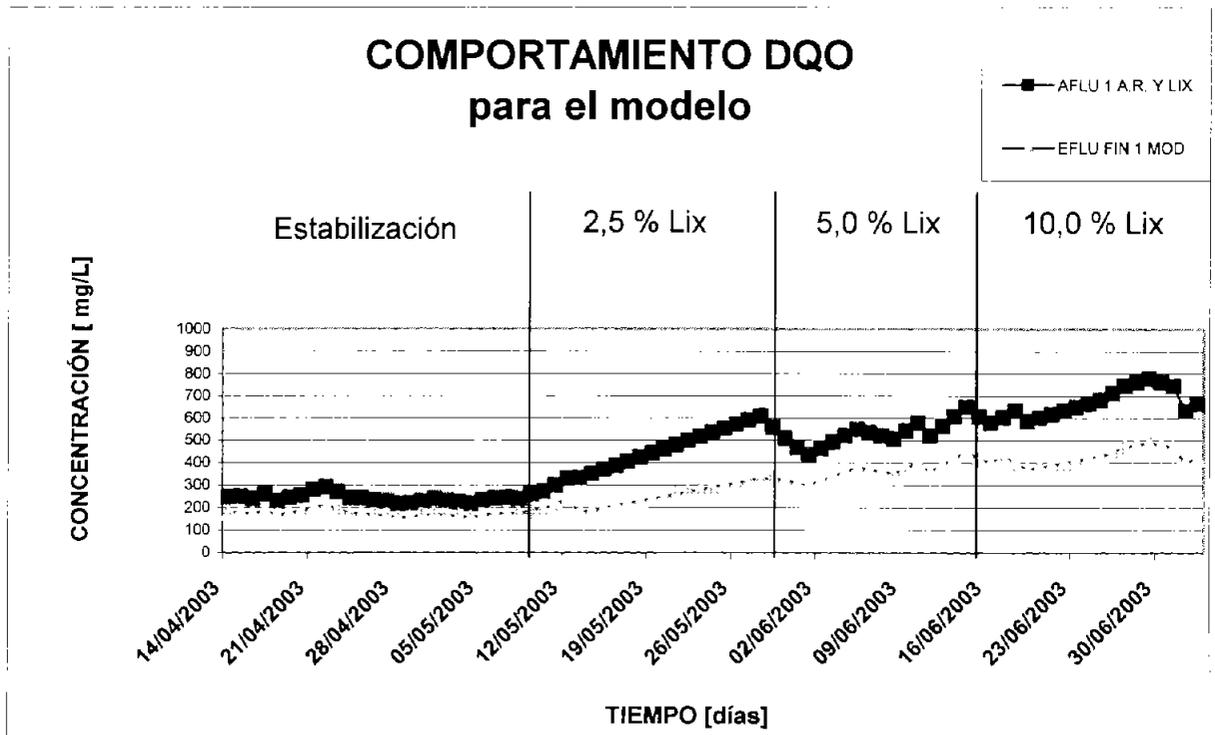


Figura 6.5 Comportamiento de DQO para el modelo en la fase I (A. R. de Texcoco)

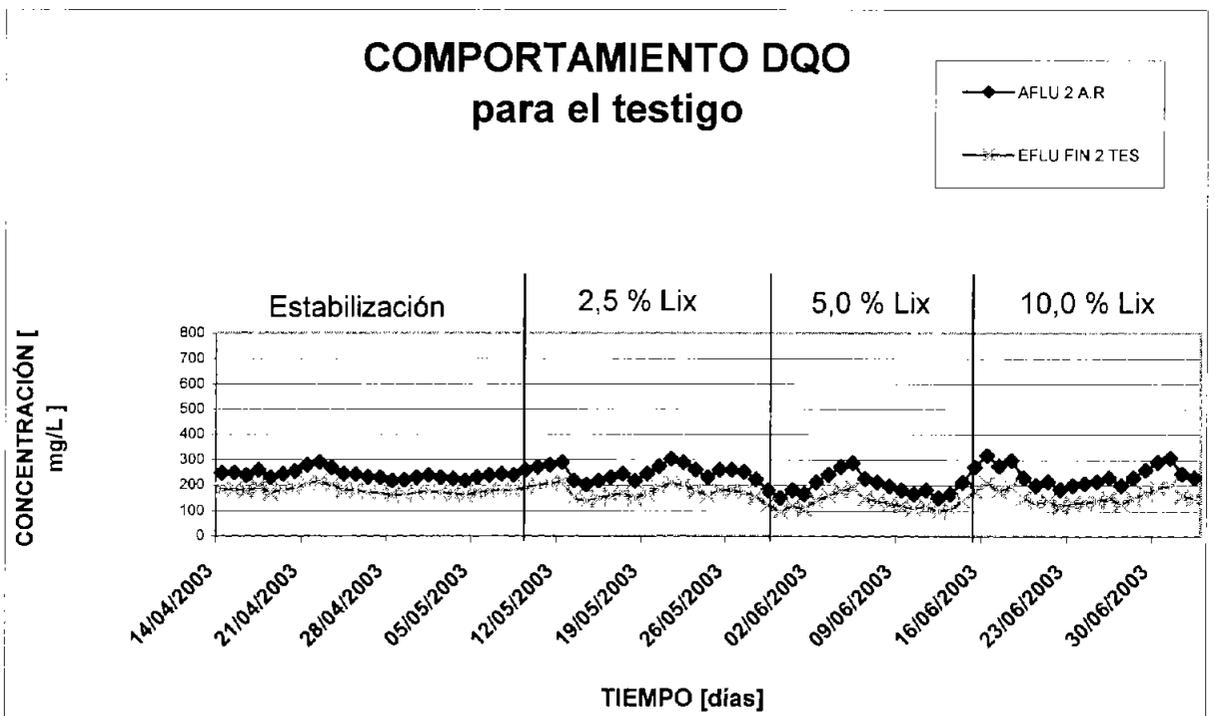


Figura 6.6 Comportamiento de DQO para el testigo en la fase I (A. R. de Texcoco)

TABLA 6.12 Porcentajes del incremento del flujo de lixiviado en el modelo con respecto al gasto del agua residual que se ingresa.

Carga de Lixiviado Joven + Viejo	Muestra	DBO₅	Incremento	DQO	Incremento
2.5%	Influente modelo	52 mg/L	15 %	461 mg/L	87 %
	Influente testigo	45 mg/L		247 mg/L	
5.0%	Influente modelo	65 mg/L	44 %	514 mg/L	152 %
	Influente testigo	45 mg/L		204 mg/L	
10%	Influente modelo	90 mg/L	80 %	672 mg/L	226 %
	Influente testigo	50 mg/L		206 mg/L	

En la tabla 6.13 se presentan los valores promedios de los análisis de laboratorio para los parámetros de control, para la fase de aplicación de lixiviado en el modelo tratando agua residual doméstica traída de la planta de tratamiento del lago de Texcoco.

Los valores de pH para la etapa de aplicación de lixiviados se encuentran entre 8.6 y 8.9; y se observa un incremento con respecto a los valores de la etapa de estabilización que eran de 8.1, este incremento no afecta el funcionamiento del modelo y esta acorde con lo publicado en la literatura con respecto a que el desempeño de las lagunas mejora con valores de pH alcalinos.

TABLA 6.13 Parámetros de control medidos en el laboratorio para la etapa de aplicación de lixiviado al agua residual de la planta de tratamiento del lago de Texcoco.

Parámetro	Influente del Testigo A.R			Influente del Modelo A.R + Lix			Efluente del Modelo			Efluente del Testigo		
	2.5%	5.0 %	10.0 %	2.5%	5.0 %	10.0 %	2.5%	5.0 %	10.0 %	2.5%	5.0 %	10.0 %
Gastos de Lixiviados												
pH	8.6	8.6	8.6	8.6	8.7	8.6	8.6	8.7	8.6	8.8	8.9	8.9
Conductividad eléctrica (µmhos/cm)	2290	2425	2321	2425	3030	6052	2546	3521	4446	2024	2187	2150
SDT (mg/L)	1145	1208	1160	1275	1499	3027	1268	1788	2239	1013	1101	1077
Ortofosfatos (mg/L)	23	30	39	40	41	36	34	38	42	34	33	32

Para la conductividad y los sólidos disueltos totales SDT los valores se incrementaron en un 50 %, este incremento se da por el aporte de lixiviado y se presenta desde el gasto de 2.5%.

No se observa un cambio en la remoción de ortofosfatos, los valores en esta etapa son similares a valores presentes en la etapa de estabilización.

6.3.2 Fase II Estudio del modelo considerando agua residual de la planta de tratamiento de la ciudad universitaria C.U.

En esta fase se mantuvo constante el gasto de agua residual y se adicionó el porcentaje de lixiviado.

TABLA 6.14 Etapas de la aplicación del lixiviado para el agua residual de la planta de C.U.

<p style="text-align: center;">ETAPA EXPERIMENTAL II 2.5 %</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mezcla de lixiviados: M2 + M8 Macrocelda 2 (estabilizado) y Macrocelda 8 (joven) ▪ Gasto de agua residual 40 mL/min. ▪ Gasto de lixiviado 1.0 mL/min.
<p style="text-align: center;">ETAPA EXPERIMENTAL III 5 %</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ M8 lixiviados Macrocelda 8 (joven) ▪ Gasto de agua residual 40 mL/min. ▪ Gasto de lixiviado 2.0 mL/min.
<p style="text-align: center;">ETAPA EXPERIMENTAL IV 10 %</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ M8 lixiviados Macrocelda 8 (joven) ▪ Gasto de agua residual 40 mL/min. ▪ Gasto de lixiviado 4.0 mL/min.

Los porcentajes de remoción para la fase de estabilización y para el testigo en esta fase (ver tabla 6.15), se presentan como altos para lagunas con valores cercanos al 90% de transformación de materia orgánica (Yáñez, 1983).

TABLA 6.15 Valores de las eficiencias de remoción para DBO₅ y DQO en la etapa de aplicación de lixiviado en el agua residual de la planta de C.U..

Gasto de lixiviado	Muestra	DBO₅	Remoción	DQO	Remoción
M2 + M8 2.5%	Influente modelo	223 mg/L	84 %	538 mg/L	60 %
	Efluente modelo	35 mg/L		215 mg/L	
	Influente testigo	212 mg/L	88 %	405 mg/L	75 %
	Efluente testigo	24 mg/L		100 mg/L	
M8 5.0%	Influente modelo	246 mg/L	76 %	650 mg/L	49 %
	Efluente modelo	58 mg/L		334 mg/L	
	Influente testigo	205 mg/L	83 %	396 mg/L	75 %
	Efluente testigo	34 mg/L		98 mg/L	
M8 10.0%	Influente modelo	257 mg/L	70 %	850 mg/L	49 %
	Efluente modelo	78 mg/L		433 mg/L	
	Influente testigo	214 mg/L	87 %	398 mg/L	78 %
	Efluente testigo	27 mg/L		89 mg/L	

Para el modelo se observa en la tabla 6.15 que los porcentajes de remoción van disminuyendo de 84% para un gasto de 2.5 %, de 76 % para el gasto de 5.0 % y de 70 % para el gasto de 10.0%, esta eficiencia es buena para un proceso biológico.

En los resultados de remoción de DQO para el testigo se observa como con el transcurso del tiempo este va mejorando su eficiencia pasando de un 67% en la etapa de estabilización a un 78 % en la presente etapa (ver figura 6.6 y 6.7).

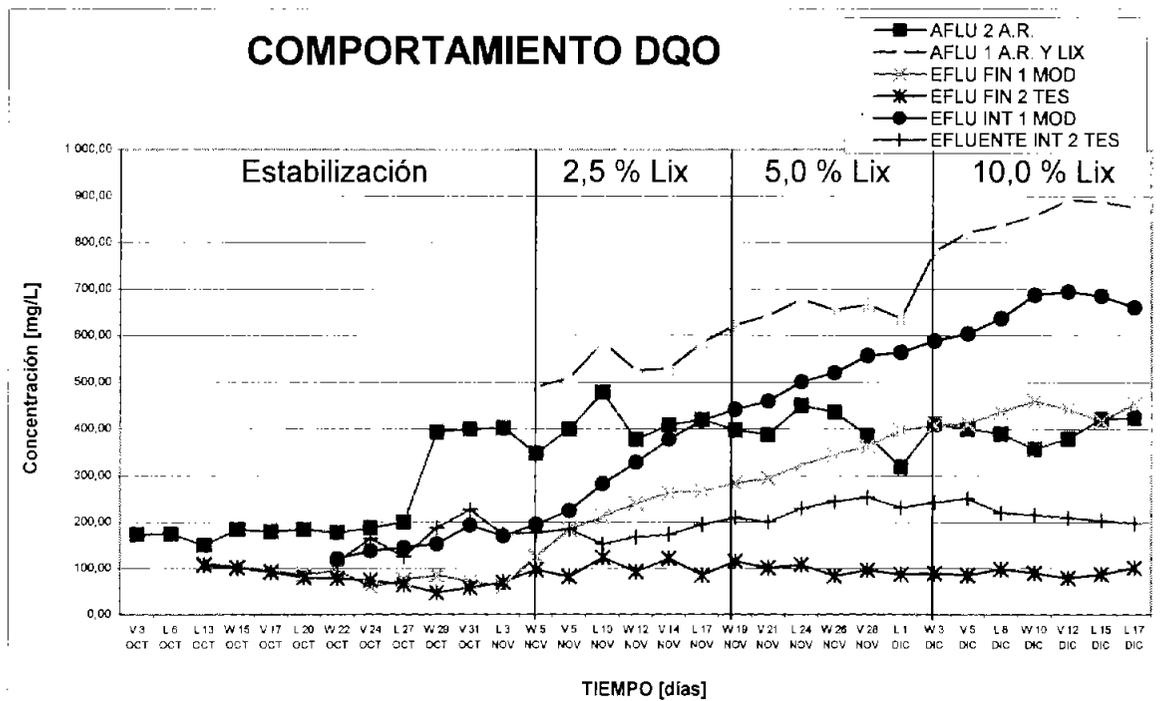


Figura 6.7 Comportamiento de DQO para la fase II aplicación de lixiviado con agua residual de la planta de tratamiento de C.U.

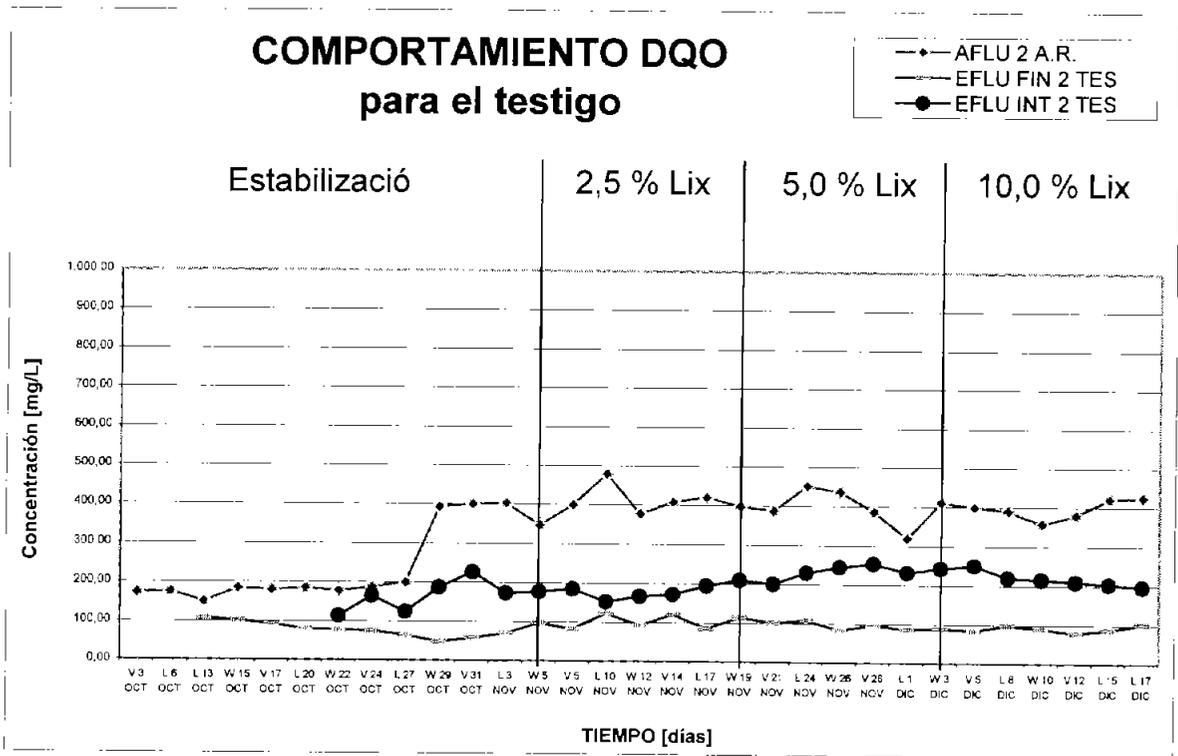


Figura 6.8 Comportamiento de DQO para el testigo en la fase II (A. R. de C.U.)

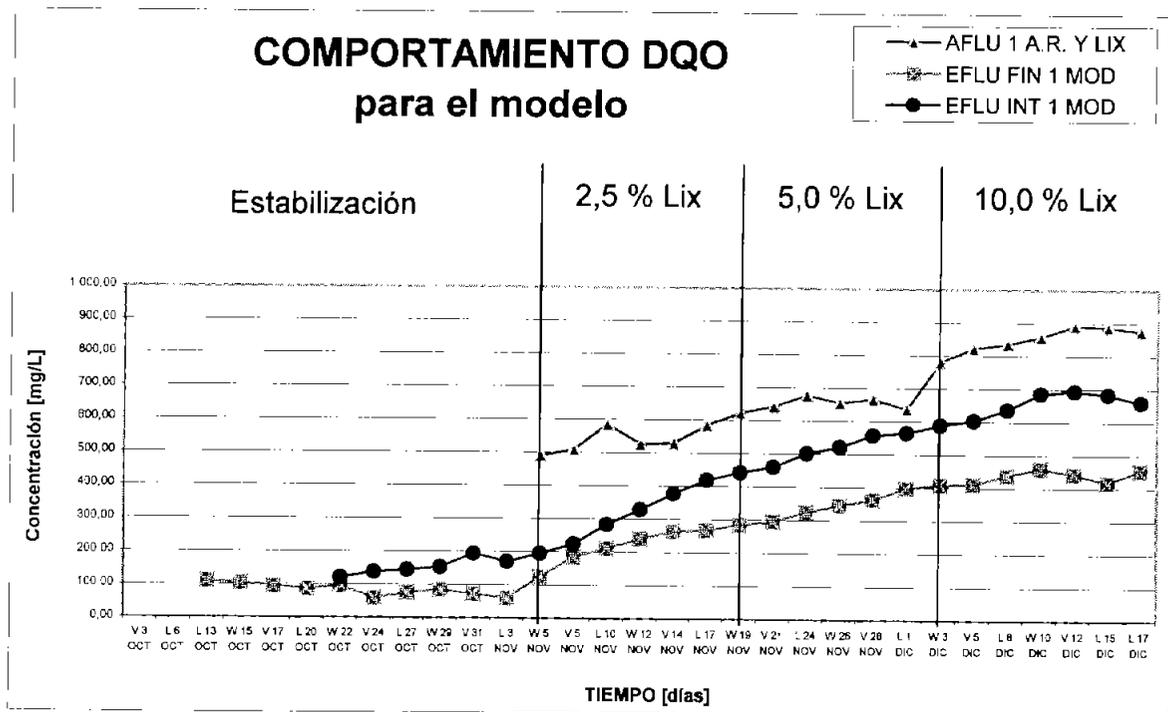


Figura 6.9 Comportamiento de DQO para el modelo en la fase II (A. R. de C.U.)

Los incrementos de materia orgánica medida como DBO_5 , indica un aporte significativo por parte del lixiviado, un 5 % para el gasto de 2.5 %, un incremento de 20% para la etapa de 5.0% y de 34% para la del 10% ver figura 6.9.

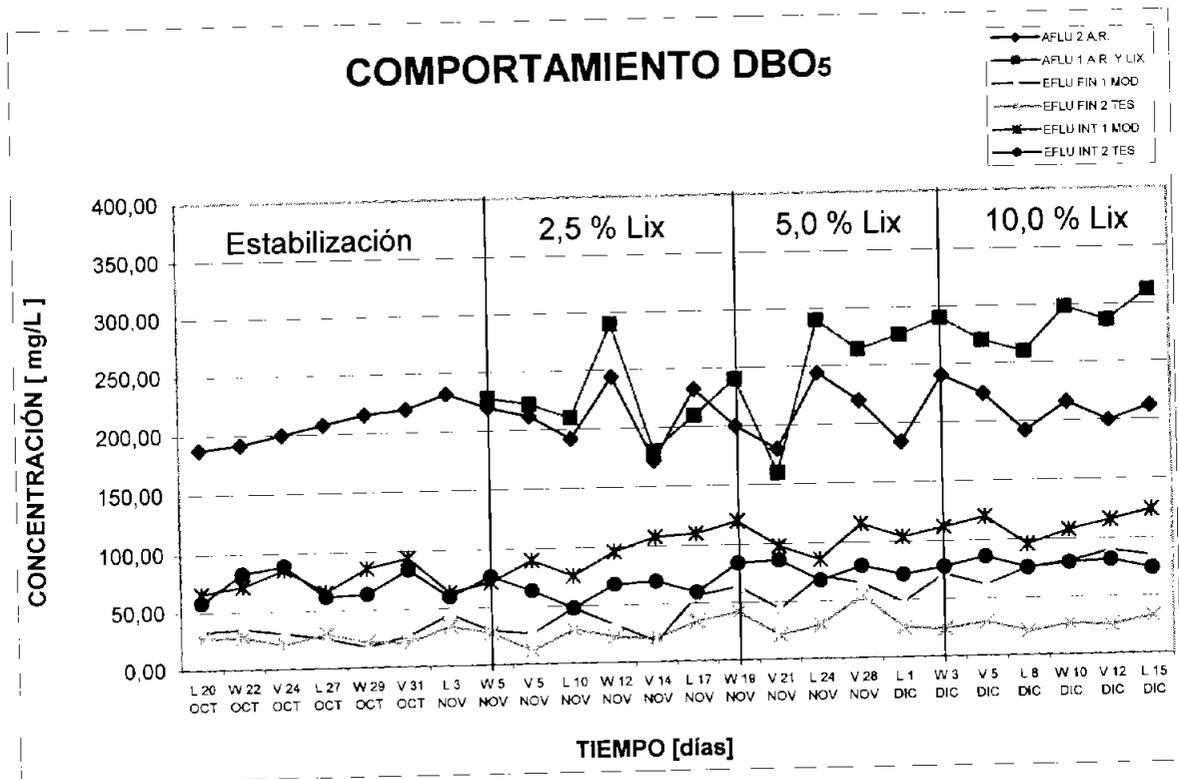


Figura 6.10 Comportamiento de la DBO_5 en la fase II (A. R. de C.U.)

En el aporte del lixiviado al influente del modelo, se ve un incremento en la concentración medida como DQO; éstos incrementos comparados con el influente del agua residual sola, son del 33%, 64% y 114% respectivamente para cada una de las etapas de aplicación del lixiviado, (ver tabla 6.17).

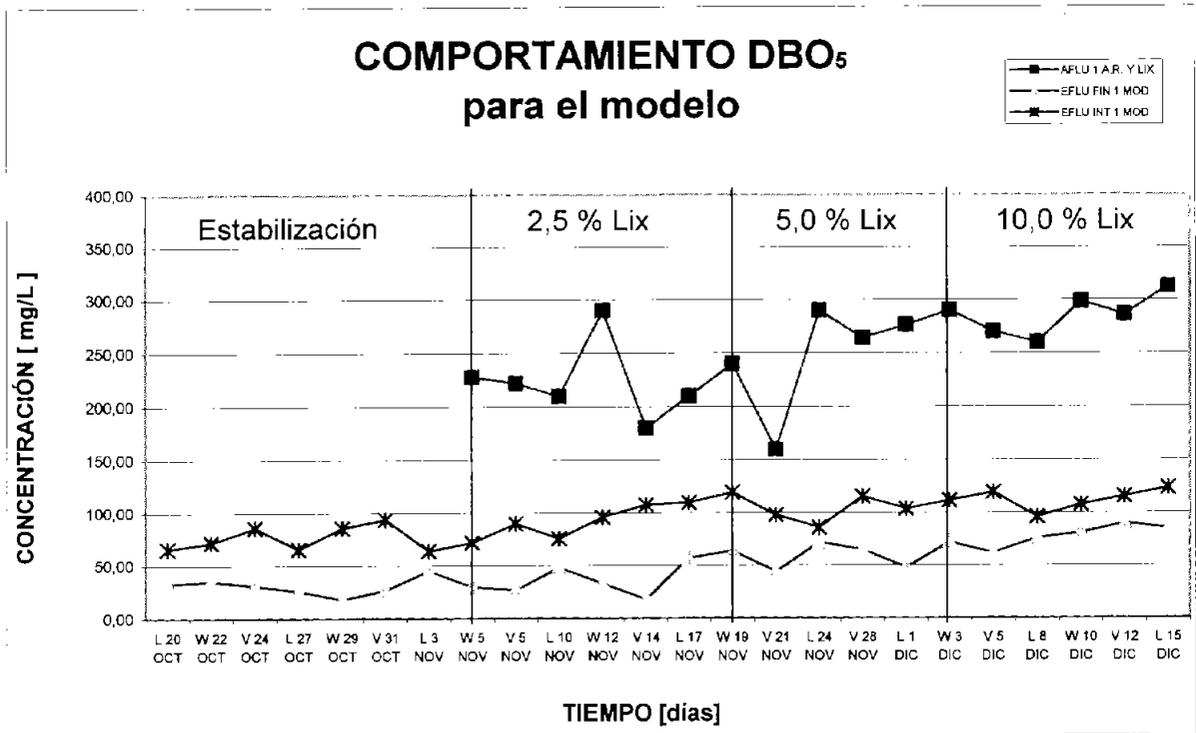


Figura 6.11 Comportamiento de DBO₅ para el modelo en la fase II (A. R. de C.U.)

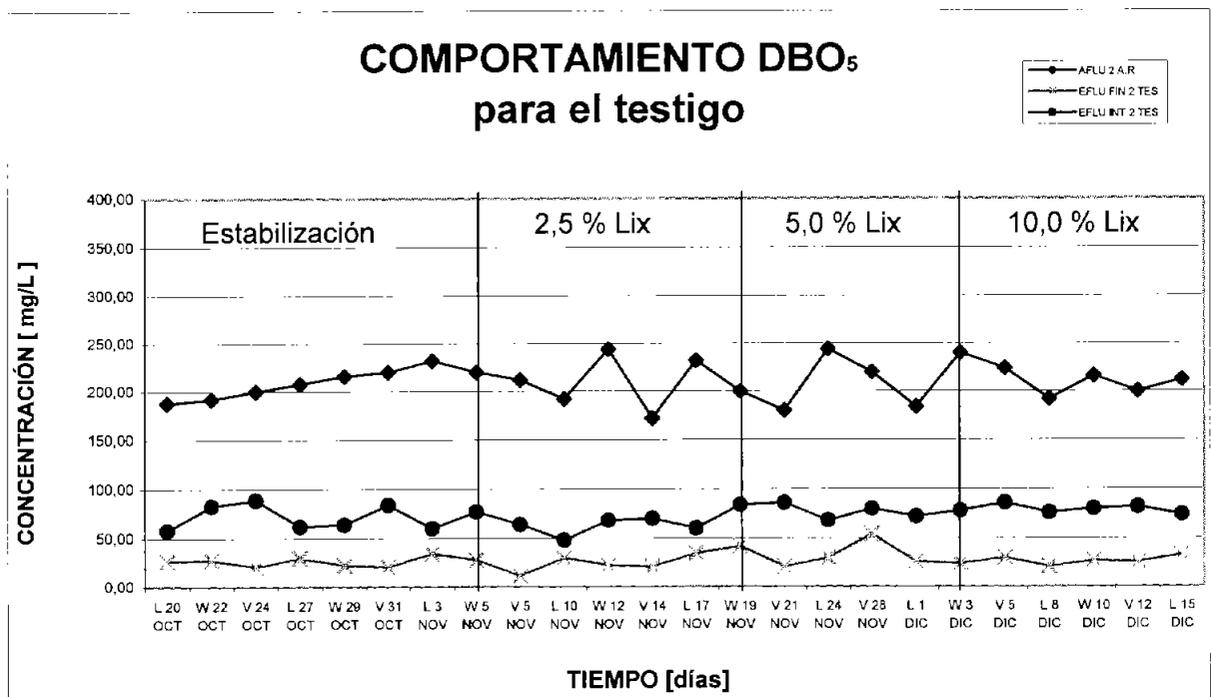


Figura 6.12 Comportamiento de DBO₅ para el testigo en la fase II (A. R. de C.U.)

TABLA 6.16 Porcentajes del incremento para las concentraciones de DBO_5 y DQO debido a la aplicación de lixiviado en modelo con respecto al testigo con agua residual de la planta de Ciudad Universitaria

Carga de Lixiviado Joven + Viejo	Muestra	DBO_5	Incremento	DQO	Incremento	DBO_5/DQO
2.5%	Influente modelo	223 mg/L	5 %	537 mg/L	33 %	0.41
	Influente testigo	212 mg/L		405 mg/L		0.52
5.0%	Influente modelo	246 mg/L	20 %	650 mg/L	64 %	0.38
	Influente testigo	205 mg/L		396 mg/L		0.52
10%	Influente modelo	286 mg/L	34 %	850 mg/L	114 %	0.34
	Influente testigo	214 mg/L		398 mg/L		0.53

La relación de DBO_5/DQO comúnmente se utiliza como una medida indirecta del contenido de materia orgánica biodegradable, para las etapas de aplicación del lixiviado vemos una relación de 0.41 para el gasto de 2.5%, de 0.38 para 5.0% y de 0.34 para 10.0%; observándose una adición creciente de la materia orgánica recalcitrante, mientras la materia orgánica biodegradable se mantuvo constante.

TABLA 6.17 Parámetros de control medidos en el laboratorio para la etapa de aplicación de lixiviado al agua residual de la planta de tratamiento de la Ciudad Universitaria.

Parámetro	Influente del Testigo A.R			Influente del Modelo A.R + Lix			Efluente del Modelo			Efluente del Testigo		
	2.5%	5.0 %	10.0 %	2.5%	5.0 %	10.0 %	2.5%	5.0 %	10.0 %	2.5%	5.0 %	10.0 %
Gastos de Lixiviados												
pH	8.0	8.1	8.3	8.2	8.4	8.6	8.2	8.4	8.5	8.3	8.4	8.5
Temperatura °C	20	17	18	20	17	18	20	17	18	20	17	18
Conductividad eléctrica	1090	1000	1220	2280	3030	5140	1590	2140	3200	1000	960	1130
SDT (mg/L)	550	500	610	1150	1510	2580	800	1070	1610	500	480	570
Turbiedad NTU	183	149	218	258	223	221	43	78	61	40	48	47
Ortofosfatos (mg/L)	29	34	37	33	38	44	28	34	38	22	22	23

Como se muestra en la tabla 6.17 Los valores encontrados para pH fueron de 8.2 para la etapa de 2.5%, de 8.4 para la de 5% y de 8.5 para la de 10%, con una pequeña variación durante todo el experimento.

Los valores solo se incrementaron levemente en comparación a la etapa de estabilización (ver tabla 6.10); continuando con características de pH básico para el modelo y testigo.

La temperatura disminuyó pasando de 20°C a 17°C esta se registró en el momento en que se tomaron las muestras para el análisis de los parámetros de laboratorio, además se observa que no hay una afectación en la eficiencia del modelo debido a las bajas temperaturas presentadas en la noche (5- 8°C).

Se presentó un incremento en los valores de la conductividad y las sales disueltas presentes en el influente del modelo debido al aporte del lixiviado, pero también se nota un leve incremento los valores del agua residual como se ve en el influente del testigo (de 1000 a 5000 $\mu\text{mhos/cm}$).

Para las concentraciones de los ortofosfatos se ve un ligero incremento por parte del influente del modelo debido a la aplicación de los lixiviados, y se observa que la remoción sigue baja, con la misma tendencia con la cual viene desde la etapa de estabilización.

6.4 Compendio de resultados

6.4.1 Porcentaje de remoción de materia orgánica medida como DBO_5 en las etapas de estabilización y aplicación del lixiviado.

TABLA 6.18 Transformación de materia orgánica para el modelo y testigo, tratando agua residual de la planta de tratamiento de Texcoco y Ciudad Universitaria.

Etapas		Estabilización	Aplicación de lixiviado		
(% de Lixiviado aplicado)		1. (0.0%)	2. (2.5 %)	3. (5.0%)	4. (10.0%)
Modelo	Texcoco	71	59	63	71
	C.U.	86	84	76	70
Testigo	Texcoco	80	68	67	70
	C.U.	88	88	83	87

El análisis del funcionamiento del modelo en la transformación de la materia orgánica medida como DBO_5 , como se observa en la tabla 6.18; se muestra la tendencia de este a estabilizar su porcentaje de remoción, asimilando las transformaciones en el medio y logrando que los microorganismos se adapten a los cambios de condiciones.

Para la primera fase del experimento donde se trabajo con agua residual de la planta de tratamiento de Texcoco, esta contenía una baja concentración de materia orgánica (ver tabla 6.4 y 6.11), para la etapa de estabilización con una concentración de 45 mg/L como DBO_5 en el influente se da un porcentaje de remoción 71%, siendo bueno para el sistema de lagunas facultativas; al aplicarle lixiviado (2.5%) esta concentración aumenta a 52 mg/L y se presenta una disminución en la remoción a 59%, pero en las siguientes etapas el modelo refleja una adaptación de los

microorganismos; mejorando la transformación de materia orgánica de 63% con una concentración de 65 mg/L (para 5.0% del gasto de lixiviado), hasta llegar a una estabilización del 71% con valores en el influente de 90 mg/L (10.0% de lixiviado), el doble de la concentración del agua residual sola (ver figura 6.13).

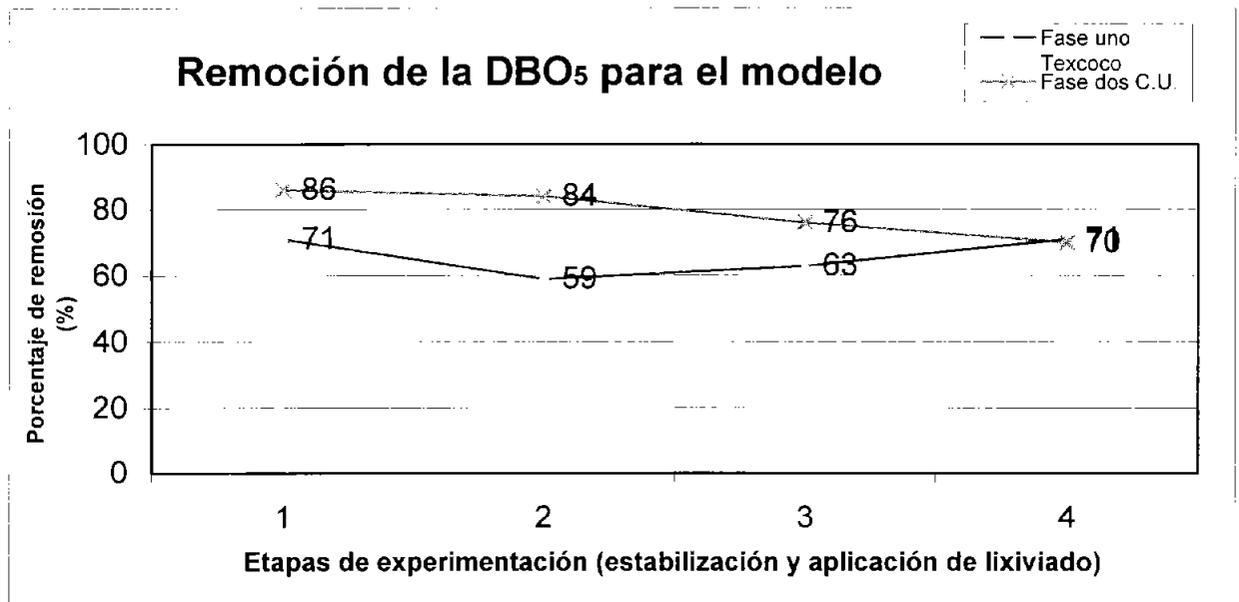


Figura 6.13 Remoción de DBO₅ para el modelo en las dos fases (Texcoco y C.U.)

Para la segunda fase (fase II) se trató agua residual de la Ciudad Universitaria, presentando concentraciones medias de DBO₅ para un agua residual típica (ver tabla 6.8 y 6.15), con valores de 208 mg/L y donde en la etapa de estabilización se presentaron porcentajes de remoción de 86%, apreciándose como muy bueno para un tratamiento de procesos biológicos; cuando se da inicio a las etapas de aplicación de lixiviado hay una disminución en los porcentajes de remoción, para el gasto de 2.5% del lixiviado tenemos un porcentaje de remoción de 84% con concentraciones en el influente de 223 mg/L; de 76% de remoción para valores de 246 mg/L en el influente del modelo cuando adicionamos el 5.0% del lixiviado, llegando hasta un valor de 70% en la remoción para concentraciones de 257 mg/L en el influente para la etapa de 10.0% de aplicación del lixiviado.

En esta fase (fase II) del experimento no se dieron altos incrementos en las concentraciones de DBO_5 por la adición del lixiviado, comparado con la primera fase donde trabajamos con agua residual de la planta de tratamiento del Texcoco.

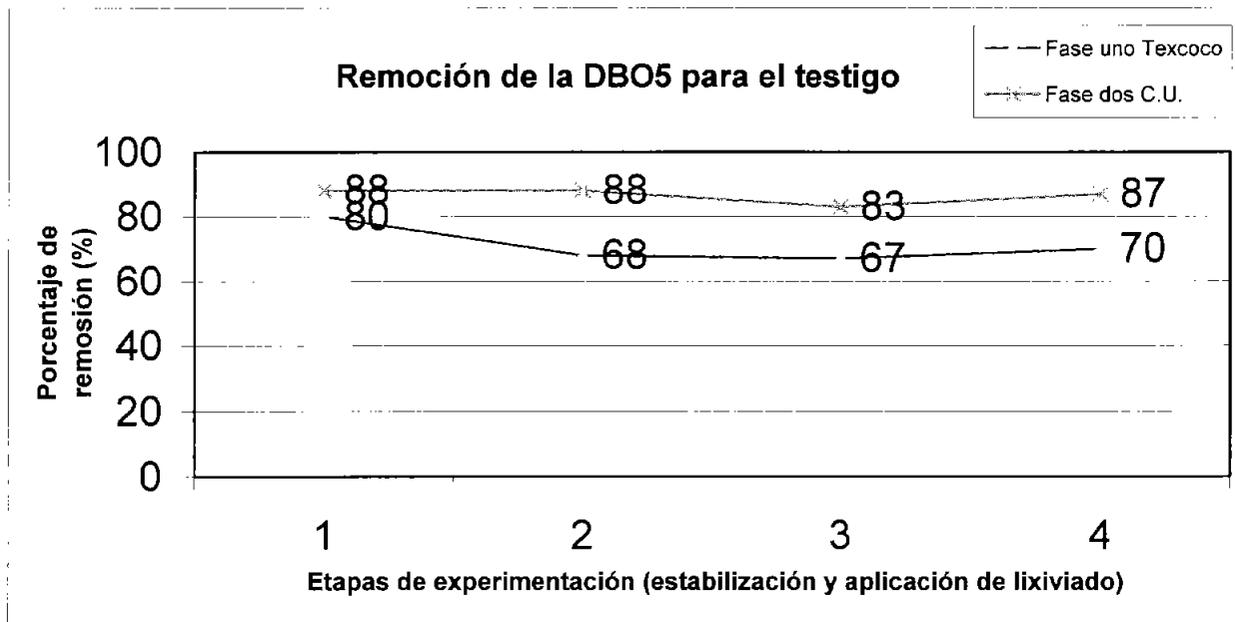


Figura 6.14 Remoción de DBO_5 para el testigo en las dos fases (Texcoco y C.U.)

Los porcentajes de remoción y las concentraciones de materia orgánica presentes para el testigo solo dependen de las características del agua residual, y en cada caso se confirma la estabilización de los procesos biológicos en el transcurso del tiempo.

6.4.2 Porcentaje de remoción de DQO.

Para la medición de la DBO_5 hay que esperar un periodo de cinco días, por esta razón se realizó la medición de la DQO con la cual se pudo llevar un control más exhaustivo.

La DQO es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente las sustancias orgánicas. Mientras que en los procesos biológicos los microorganismos

transforman la fracción biodegradable (DBO_5/DQO) que contiene el influente, en este caso agua residual y lixiviado de un relleno sanitario.

TABLA 6.19 DQO para el modelo y testigo, tratando agua residual de la planta de tratamiento de Texcoco y Ciudad Universitaria.

Etapas		Estabilización	Aplicación de lixiviado		
(% de Lixiviado aplicado)		1. (0.0%)	2. (2.5 %)	3. (5.0%)	4. (10.0%)
Modelo	Texcoco	26	46	31	37
	C.U.	64	60	49	49
Testigo	Texcoco	28	31	34	35
	C.U.	67	75	75	78

En la etapa de estabilización de la fase I con agua residual de la planta de Texcoco, para el modelo se obtuvieron remociones de DQO iguales a 26%, las cuales son bajas, pero no así para las remociones de DBO_5 vistas anteriormente; además se observo en que al incorporarle lixiviado (de 2.5%) este apporto un incremento del 15% medido como DQO (ver tabla 6.12), y presentándose un porcentaje de remoción del 46% favorable para el funcionamiento del modelo; para las siguientes etapas de aplicación de lixiviado, para el gasto de 5.0% de lixiviado se dio una remoción del 31% y para la adición del 10.0% del lixiviado el porcentaje de remoción fue de 37%; de esta forma se observa una tendencia en busca del equilibrio (ver figura 6.15).

Mientras para la segunda fase con agua residual de C.U. cuya concentración de DQO es mayor, en la etapa de estabilización se observan valores de remoción de 64% (ver tabla 6.19) al incorporarle lixiviado, este tiene un efecto negativo; para la adición de 2.5% de lixiviado disminuyendo la remoción de DQO a valores de 60% y de 49% para las etapas de 5.0% y 10.0% respectivamente (ver figura 6.15).

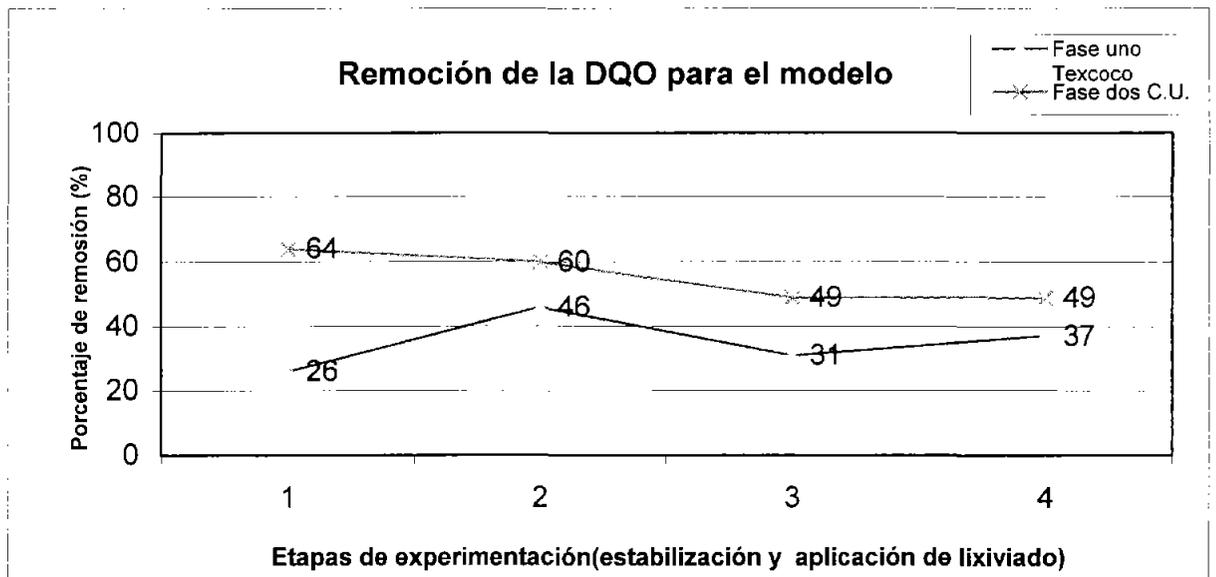


Figura 6.15 Remoción de DQO para el modelo en las dos fases (Texcoco y C.U.)

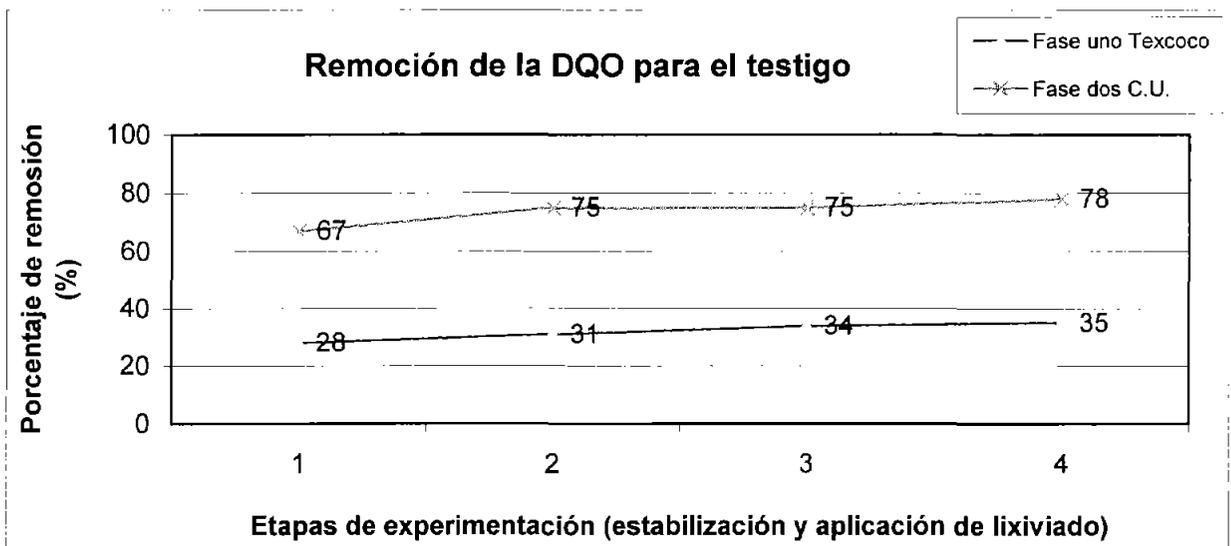


Figura 6.16 Remoción de DQO para el testigo en las dos fases (Texcoco y C.U.)

Como se muestra en la figuras 6.13, 6.14, 6.15 y 6.16 la tendencia tanto del modelo como el testigo, es buscar una estabilización de los procesos biológicos en el tiempo; adaptándose los microorganismos a los cambios de concentraciones medidas como DBO_5 y DQO.

7. CONCLUSIONES

- ✓ El estudio cumplió con el objetivo planteado ya que se comprueba que el funcionamiento del modelo medido como porcentaje de remoción no se ve afectado de una forma importante con la aplicación de lixiviado perteneciente a un relleno sanitario.

- ✓ El modelo representó el funcionamiento del sistema de lagunas facultativas mediante la similitud de la constante de biodegradación y concentraciones de materia orgánica medida como DBO_5 en las etapas de experimentación.

- ✓ Se observó un buen comportamiento del modelo durante las etapas de experimentación, no se presentaron problemas en su funcionamiento y en términos generales mantuvo una buena eficiencia en la remoción de materia orgánica, inclusive en las etapas de aplicación de lixiviado; dando estos resultados en la remoción de DBO_5 .
Fase I (Texcoco): estabilización 71%, aplicación de lixiviado (2.5%) 59%, (5.0%) 63% y (10%) 71%.
Fase II (C.U.): estabilización 86%, aplicación de lixiviado (2.5%) 68%, (5.0%) 67% y (10%) 70%.

- ✓ Con respecto a las condiciones operativas del modelo durante las etapas experimentales, se consideró que la aportación de lixiviado del relleno sanitario perteneciente a Bordo Poniente Etapa IV hasta 10% respecto al gasto de agua residual, no afectó el sistema biológico de tratamiento, de acuerdo con el desempeño de los parámetros fisicoquímicos evaluados durante la investigación.

- ✓ También se concluye que entre menos contenido de materia orgánica (medida como DBO_5) contenga el agua residual doméstica a tratar mediante un proceso biológico, más atractivo es la adición de lixiviado para aumentar esta concentración; siempre y cuando se pueda dar un seguimiento a la aplicación de éste.
- ✓ Se logró demostrar la adaptabilidad de la flora microbiana (especialmente los géneros de algas: Las *Clorofitas* (algas verdes) y las *Euglenofitas* (euglenas)) de un sistema de lagunas facultativas a diferentes condiciones, evaluando dos tipos de aguas residuales de diferentes características, y luego la aplicación del lixiviado proveniente de un relleno sanitario.
- ✓ Los valores de oxígeno disuelto en la zona aerobia de los modelos se mantuvieron entre 1 y 3 mg/L, lo que aseguró las condiciones apropiadas para el metabolismo de los microorganismos. Otros parámetros como el pH, los ortofosfatos, la conductividad, los SDT, experimentaron cambios poco apreciables.
- ✓ Al realizar una comparación de la materia orgánica que aporta el lixiviado en las dos fases del experimento, se observa que para el caso del agua residual proveniente de la planta de tratamiento de Texcoco, la cual fue evaluada como diluida con una concentración baja de DBO_5 , son significativos los incrementos de materia orgánica entre 60 y 70%, mientras que para el agua que ingresa a la planta de C.U. catalogada como de concentración media de DBO_5 los incrementos solo van del 5 al 30%.

- ✓ Dado el contenido de materia orgánica en los lixiviados del relleno sanitario Bordo Poniente IV etapa como DQO y DBO₅ de 5,500 mg/L y 1,000 mg/L respectivamente (relación DBO₅/ DQO: 0.2). es posible su tratamiento en el sistema lagunar prototipo (laguna facultativa real).

- ✓ Finalmente se concluye de este estudio que la incorporación de los lixiviados al sistema de tratamiento mediante lagunas facultativas, constituye una alternativa de disposición y/o tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario Bordo Poniente etapa IV. Así mismo queda de manifiesto la factibilidad del uso de instalaciones existentes para el tratamiento de aguas residuales en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios.

RECOMENDACIONES

- ✓ Durante la experimentación no se hizo el calculo del tiempo de residencia celular, se recomienda hacerlo cuando se realice el calculo del tiempo de retención hidráulico; para mejorar las condiciones que hagan falta al incorporarle el lixiviado al prototipo o laguna real.

- ✓ También si se decide usar el sistema lagunar de Texcoco para tratar los lixiviados en estudio se recomienda que esto se haga de manera paulatina para evitar una posible desestabilización del funcionamiento del sistema lagunar.

8. BIBLIOGRAFÍA

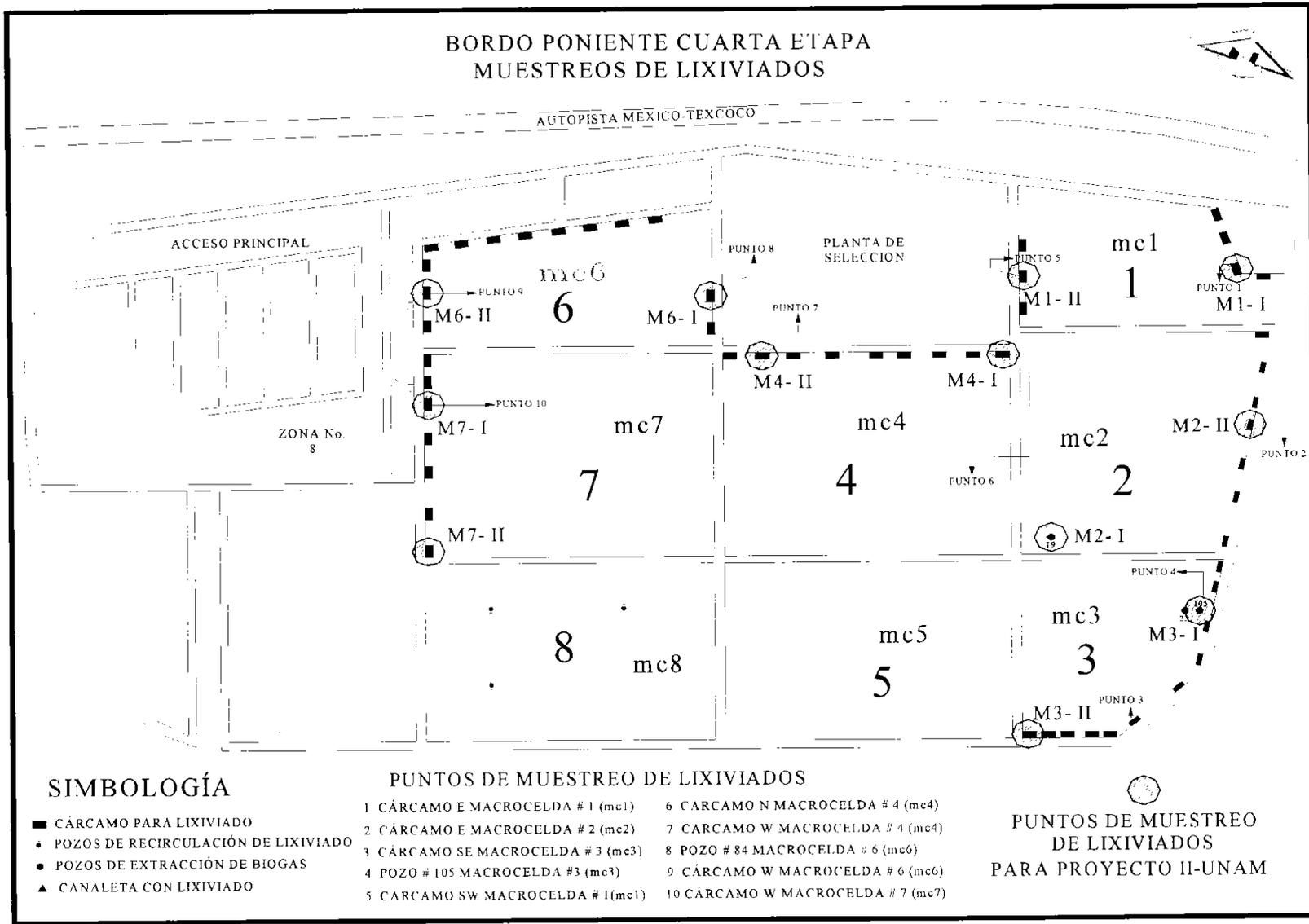
- APHA, AWWA, WPCF. (1994). Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Ediciones Díaz de Santos, España.
- Arboleda, V. J. (1992). Teoría y practica de la purificación del agua. 2da Ed, Edit Acodal, Colombia.
- CETESB, (1989). Diseño de lagunas de estabilización como tratamiento. Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental, de la Secretaria del Medio Ambiente del gobierno de Sao Paulo.
- Christensen, T. and Stegman, R. (1989). Sanitary landfilling. Edit Academic press limited, England.
- Conieco, (2003). Memoria técnica XI congreso internacional ambiental. Consejo nacional de industriales ecologistas de México.
- CNA, (1998). Manual de funcionamiento de lagunas facultativas del lago de Texcoco. Gerencia Estatal Texcoco, Comisión Nacional del Agua, México.
- Darley, M. (1987). Biología de las algas. Enfoque Fisiológico. Ed. Limusa, México.
- Degremont, (1979). Manual Técnico del agua. Edit Artes graficas Grijelmo, España.
- DGSU, (2002). Gerencia Técnica. Dirección General de Servicios Urbanos, del D.F. México.
- Eckenfelder, W. W. (1966). Industrial Water Pollution Control. New York: McGraw-Hill, USA.
- Flores, O. P. (1994). Caracterización y tratabilidad biológica por vía anaerobia de lixiviados de rellenos sanitarios. Tesis de ingeniería química, UNAM, México.
- Jaramillo, J. (1986). Residuos Sólidos Municipales. Organización Panamericana de la Salud (OPS), Perú.
- Jica, (1999). Estudio sobre el manejo de residuos sólidos para la ciudad de México de los Estados Unidos Mexicanos. DGSU, Kokusai Kogyo co., LTD, México.
- Kawamura, S. (1991). Integrated design of water treatment facilities. Edit. John Wiley, USA.
- Margalef, R. (1983). Limnología. Ed. Omega, Barcelona, España.
- Masters, G. M. (1991). Environmental engineering and science. McGraw-Hill, USA.
- Mendoza E. A. (1990). Tratamiento de aguas residuales mediante sistema de lagunaje. Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente (CEPIS), Organización Panamericana de la Salud (OPS), Perú.

- Metcalf and Eddy (1991). Ingeniería de Aguas residuales. Tratamiento, vertimiento y reutilización. McGraw-Hill. USA.
- Montgomery, D.C. (1985). Water treatment principles and design. Ed. John Wiley, USA.
- Montgomery, D. C. (1991). Diseño y Análisis de Experimentos. Ed. Iberoamerica, México.
- MOP 8, (1998). WEF Manual of practice 8, ASCE Manual and Reporto on Engineering Practice # 76, Design of municipal waster treatment plants. 4th Ed, Edit Water environment federation, USA.
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisible de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación, 6 de enero de 1997.
- Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Diario Oficial de la Federación, 3 de junio de 1998.
- Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Diario Oficial de la Federación, 21 de septiembre de 1998.
- Orta de Velásquez, M. T., González, M. S., Monje, R. I. y Valdivia, S. C. A. (1999). Estudio de tratabilidad de lixiviados en la planta de tratamiento de aguas residuales municipales Santa Fe. Realizado para la Dirección General de Servicios Urbanos del D.F.
- Orta de Velásquez, M. T., Ramírez, Z. R. M., Monje, R. I., Torres, B. L. A., Díaz, P. V., Sánchez, I., Gómez, C. C. y Romero, A. (1997). Tratabilidad de los lixiviados de la etapa III y IV del relleno sanitario Bordo Poniente. Realizado para la Dirección General de Servicios Urbanos del D.F.
- Qasim, R. S. and Chiang, W. (1994). Sanitary Landfill Leachates: Generation, Control and Treatment. Printed in the United States of America. Technomic Publishing Company, Inc.
- Ramos, H. J. G. (1998). Comparación de los requerimientos de área al aplicar los métodos de diseño para lagunas de estabilización. Tesis de Maestria. División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería.
- Robinson, H. and Maris, J. (1985). The treatment of Leachates from Domestic Waste in Landfill Sites. *Journal WPCF*, 57(1).
- Romero, R. J. (1999). Potabilización del agua. 3era Edición, Ed. Alfaomega. Colombia.
- Romero, R. J. (1999). Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización. 3era Edición, Ed. Alfaomega, Colombia.

- Sánchez, G. J. (2003). Tecnología en el proceso de operación, clausura y saneamiento de rellenos sanitarios. Sistemas de ingeniería y control ambiental. México.
- Schulz y Okun, (1990). Tratamiento de aguas superficiales para países en desarrollo. Cap. 6, Ed. Limusa, México.
- Sena, O. L. S. (1967). Lagoas de Estabilização. Início do Seu Uso no Brasil e a Nova Agricultura das Algas, *Revista Brasileira de Engenharia Sanitária*, Ano 6, No 1.
- SMA, (1996). Secretaria del Medio Ambiente. Temas Ambientales, Semarnat, México
- Sotelo, A. G. (1997). Hidráulica general. Vol II, UNAM, México.
- Sotelo, A. G. (2000). Hidráulica general. Vol I, Ed. Limusa, México.
- Unam, (1966). Apuntes del curso intensivo No 8: Lagunas de estabilización. Apuntes, Unam, México.
- Velasco, J., Rosas, A. y Solórzano, G. (2003). Caracterización de peligrosidad en lixiviados y biogás generados en un relleno sanitario de residuos sólidos municipales. Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA), Instituto Nacional de Ecología (INE).
- Yáñez, C. F. (1983). Evaluación de Lagunas de estabilización. Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente (CEPIS), Organización Panamericana de la Salud (OPS), Perú.

ANEXOS

Anexo # 1 Diagrama del relleno sanitario Bordo Poniente Etapa IV



Anexo # 2 Reporte de resultados de lixiviados para el sitio de disposición final Bordo Poniente Etapa IV (mes de enero / 2001)

	PARÁMETROS	UNIDADES	NE MACROCELDA 1	E MACROCELDA 2	W MACROCELDA 3	W MACROCELDA 2	N MACROCELDA 4	SE MACROCELDA 6	N MACROCELDA 7	W MACROCELDA 7	VALOR MAX	VALOR MIN	VALOR PROM.
PARAMETROS TOMADOS EN EL LABORATORIO CENTRAL DE BIOLOGIA AMBIENTAL	pH	ml/l	8,89	9,03	9,24	9,52	8,98	9,05	8,80	9,39	9,52	8,80	9,11
	Temperatura	ml/l	25,20	24,40	23,70	24,40	23,90	24,30	23,90	24,70	25,20	23,70	24,31
	Sólidos Sedimentables	ml/l	0,10	< 0.1	0,20	0,30	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0,10	0,30	0,10	0,18
	Sólidos Totales Totales	mg/l	27.400,00	28.680,00	31.910,00	34.270,00	23.460,00	33.020,00	25.260,00	41.210,00	41.210,00	23.460,00	30.651,25
	Sólidos Totales Volátiles	mg/l	2.310,00	2.580,00	8.370,00	2.840,00	3.190,00	4.390,00	3.550,00	3.480,00	8.370,00	2.310,00	3.838,75
	Sólidos Totales Fijos	mg/l	25.090,00	26.100,00	23.540,00	31.430,00	20.270,00	28.630,00	21.710,00	37.730,00	37.730,00	20.270,00	26.812,50
	Sólidos Suspendedos Totales	mg/l	120,00	145,00	470,00	345,00	175,00	470,00	340,00	350,00	470,00	120,00	301,88
	Sólidos Suspendedos Volátiles	mg/l	35,00	80,00	220,00	80,00	82,00	260,00	180,00	160,00	260,00	35,00	137,13
	Sólidos Suspendedos Fijos	mg/l	85,00	65,00	250,00	265,00	90,00	210,00	160,00	190,00	265,00	65,00	164,38
	Sólidos Disueltos Totales	mg/l	27.280,00	28.535,00	31.440,00	33.925,00	23.285,00	32.550,00	24.920,00	40.860,00	40.860,00	23.285,00	30.349,38
	Sólidos Disueltos Volátiles	mg/l	2.275,00	2.500,00	8.150,00	2.760,00	3.105,00	4.130,00	3.370,00	3.320,00	8.150,00	2.275,00	3.701,25
	Sólidos Disueltos Fijos	mg/l	25.005,00	26.035,00	23.290,00	31.165,00	20.180,00	28.420,00	21.550,00	37.540,00	37.540,00	20.180,00	26.648,13
	Grasas y Aceites	mg/l	257,60	181,60	518,40	158,00	212,00	252,80	180,00	172,40	518,40	158,00	241,60
	D.Q.O.	mg O ₂ /l	2.403,18	2.502,48	12.969,21	2.462,76	4.846,07	6.216,48	3.972,19	4.468,72	12.969,21	2.403,18	4.980,14
	D.B.O.	mg/l	1.528,10	1.734,28	12.465,07	1.816,61	1.857,70	2.060,38	1.840,53	1.665,47	12.465,07	1.528,10	3.121,02
	<i>Salmonella sp.</i>	Pres./Aus.	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	PRESENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	----	----	----
	<i>Escherichia coli</i>	Pres./Aus.	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	----	----	----
	<i>Streptococcus faecalis</i>	Pres./Aus.	PRESENCIA	PRESENCIA	PRESENCIA	PRESENCIA	PRESENCIA	PRESENCIA	PRESENCIA	PRESENCIA	----	----	----
	<i>Shigella dysenteriae</i>	Pres./Aus.	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	----	----	----
	<i>Clostridium tetani</i>	Pres./Aus.	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	----	----	----
Coliformes totales	NMP/100ml	500,00	170,00	230,00	11.000,00	5.000,00	17.000,00	300,00	230,00	17.000,00	170,00	4.303,75	
Coliformes Fecales	NMP/100ml	< 20	< 20	40,00	11.000,00	2.400,00	8.000,00	230,00	< 20	11.000,00	40,00	4.334,00	
<i>Candida albicans</i>	Pres./Aus.	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	PRESENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	----	----	----	
<i>Candida sp</i>	Pres./Aus.	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	AUSENCIA	PRESENCIA	AUSENCIA	PRESENCIA	PRESENCIA	----	----	----	