



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

SELECCIÓN Y PROPUESTA DE UN SISTEMA DE  
TRATAMIENTO QUE PERMITA OBTENER, A PARTIR DEL  
AGUA DE LOS CANALES DE LA ZONA CHINAMPERA, AGUA  
CON CALIDAD PARA RIEGO DE HORTALIZAS.

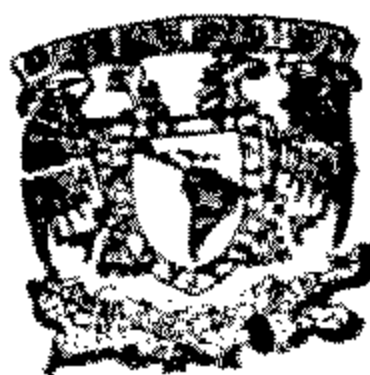
T É S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

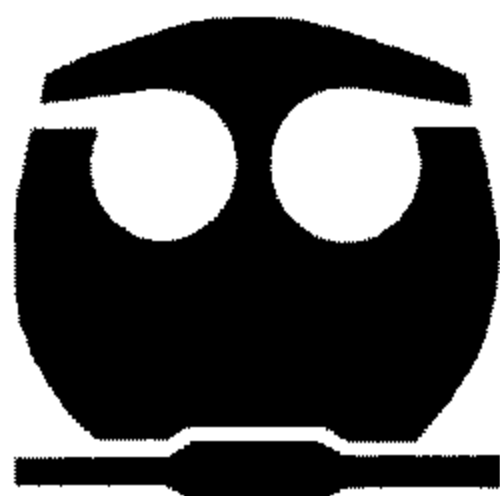
INGENIERA QUÍMICA

P R E S E N T A :

TANIA GRANADOS OLVERA



EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUÍMICA



MÉXICO D.F.

2005

M 352065



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

Jurado Asignado:

Presidente	Prof. Rodolfo Torres Barrera
Vocal	Prof. Víctor Manuel Luna Pabello
Secretario	Profra. Hilda Elizabeth Calderón Villagómez
1er Suplente	Prof. Baldomero Pérez Gabriel
2º Suplente	Prof. Fulvio Mendoza Rosas

Sitio donde se desarrolló el tema:  
**Laboratorio de microbiología experimental. Facultad de Química.  
Ciudad Universitaria**

Asesor de tema:



**Dr. Víctor Manuel Luna Pabello**

Sustentante



**Tania Granados Olvera**

## AGRADECIMIENTOS

*A la Universidad Nacional Autónoma de México por ser una ventana al mundo en todos los aspectos, por ser mi casa y mi motor.*

*Al Dr. Luna por apoyarme en estos momentos tan importantes de mi vida, por asesorarme en esta tesis y por ser un ejemplo a seguir.*

*A la Facultad de Química y a sus profesores por brindarme conocimientos y enseñanzas tan significativas.*

*A mis compañeros del laboratorio de Microbiología Experimental por ayudarme y hacerme amenos los últimos meses en la Facultad, Ernesto, Benjamín, Pati, Alicia, Adriana, Rene, Héctor, Javier y la maestra Lupita.*

*Al laboratorio de Microbiología Experimental.*

*Al laboratorio de Ingeniería Química por facilitarme equipo.*

## DEDICATORIAS

*A Angel por darme seguridad y por enseñarme a ser sensible a este mundo tan maravilloso y frágil.*

*A Laura por ser mi primera maestra y mi más grande ejemplo de tenacidad, honradez, justicia y belleza humana.*

*A mis hermanos Angela y Páuel por ser diferentes, únicos y estar cerca de mí.*

*A mi familia que quiero y que siempre ha sido un apoyo en mi vida.*

*A mis tíos Toño, Cristina, Carlos, Carmen, Fernando, Manu y Mari.*

*A mis abuelos especialmente a Cristina*

*A mis niños Johan, Airam y Bertín que son una alegría.*

*A mis profesores Inés, Lucrecia y Javier Barajas que me han hecho sentir que el mundo es grande.*

*A Patricio que me ha dado toda clase de alegrías y que más que ser un apoyo es un motivo para crecer.*

*A Elías que me ha hecho ver cosas que no conocía de mí y me ha mostrado que la soledad es una amiga.*

*A mis amigos que me han acompañado a lo largo de la vida*

*A Katia*

## INDICE

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. OBJETIVOS	4
3. ANTECEDENTES	5
3.1 Actividades principales	7
3.1 La zona chinampera de la Ciudad de México	5
3.2 Problemática abordada	12
3.2.1 Contaminación del agua	15
3.2.2 Repercusión en la agricultura	17
3.2.3 Problemas a la salud pública	20
4. MARCO TEÓRICO	22
4.1 Características del agua de los canales de la zona chinampera	22
4.2 Normatividad	24
4.3 Sistemas de Tratamiento de agua	28
4.3.1 Humedales Artificiales	33
4.3.2 Información necesaria para la realización del diseño e implementación de un humedal artificial	38
5. ESTRATEGIA DE TRABAJO	39
5.1 Planeación	40
5.2 Diseño del sistema de tratamiento	42
5.3 Selección de los componentes del humedal y del sistema experimental	44
5.4 Presupuesto	45
5.4.1 Características del lugar	48
5.4.2 Bases y criterios de diseño para equipo	49
5.4.3 Filosofías básicas de operación	53
5.5 Ingeniería básica	46
6. EVALUACIÓN TÉCNICA	56
6.2 Ensayos experimentales	57

6.3 Obtención de la eficiencia de remoción de materia orgánica y evaluación de la resistencia de la planta al agua	57
6.3.1 Descripción del experimento	57
6.3.2 Materiales y métodos	59
6.3.3 Resultados de la primera etapa	60
6.3.4 Resultados de la segunda etapa	66
7. EVALUACIÓN ECONÓMICA	70
7.1 Estrategias de abastecimiento de agua.	71
7.2 Evaluación del proyecto	73
7.3 Desempeño acumulado	75
8. EVALUACIÓN AMBIENTAL	78
9. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	79
10. CONCLUSIONES	83
BIBLIOGRAFÍA	85
ANEXOS	90

## RESUMEN

Debido a la falta de recursos económicos, así como al desconocimiento de alternativas de tratamiento de agua adecuadas, los agricultores de la zona de Xochimilco utilizan, para el riego de sus chinampas, el agua contenida en los canales. El agua de estos canales contiene entre otros contaminantes, los catalogados como de tipo parasitario y patógeno, lo que representa un riesgo para la salud humana según lo indicado en la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales.

Para lograr una calidad de agua acorde a los requerimientos oficiales y que además sean de bajo costo y de fácil operación e implementación, existen diversas ecotecnologías, entre las que destacan los sistemas de tratamiento biológico a base de plantas vasculares emergentes, conocidos comúnmente como pantanos o humedales artificiales. Entre los inconvenientes a resolver se encuentran los asociados a su construcción en zonas vadosas, asimismo, desde el punto de vista ecológico, se halla restringido el tipo de construcciones a realizar. Esto último sobre todo por tratarse de zonas catalogadas como "Patrimonio de la humanidad". Además desde el punto de vista de tenencia de la tierra, son ejidos, lo que a su vez complica la asignación de espacio para su construcción.

En este contexto, el presente trabajo se enfocó a la elaboración de una propuesta de un humedal artificial de flujo subsuperficial diseñado para producir agua tratada con calidad aceptable para el riego agrícola restringido. Asimismo, se realizó el análisis de los beneficios económicos y ambientales.



## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha decrecido de manera significativa la producción agrícola no solo en el país sino también en la Ciudad de México, esto se debe a diversos factores como son: el incremento de la mancha urbana, la baja rentabilidad, los problemas del suelo y la falta de agua con la calidad adecuada entre otros.

Las chinampas de la Ciudad de México ubicadas en las delegaciones de Tláhuac y Xochimilco son importantes no solo porque en ellas se llevan a cabo actividades agrícolas sino también por su trascendencia cultural e histórica, a lo largo de los años las zonas chinamperas se han visto seriamente deterioradas ocasionando entre otros, problemas ecológicos y económicos, la probabilidad de que Xochimilco pierda su carácter de Patrimonio de la Humanidad otorgado en 1987 por la UNESCO es prueba de que se vive un serio problema que debe solucionarse de inmediato.

El crecimiento de la población ha ocasionado la invasión de las zonas chinamperas originando un incremento en la contaminación de los canales circundantes debido al vertido directo de aguas residuales de carácter doméstico sobre éstos. Esto denota graves inconvenientes debido a que los campesinos de las zonas chinamperas riegan sus cultivos con aguas provenientes de los canales contaminados, generando una baja calidad en los productos y serios problemas de salud (Muller, 1991). La falta de agua con calidad de riego agrícola propicia a su vez otro de los motivos por el cual los campesinos abandonan sus actividades agrícolas, además la falta de producto o la poca calidad de éste (Hernández, 2003) disminuye la rentabilidad.

El abandono del campo y la baja rentabilidad ocasionan problemas económicos y sociales en nuestro país por ello es importante buscar los medios que permitan solucionar este problema atacándolo no solo desde el punto de vista

político y social sino también tecnológico. En base a esto es importante desarrollar las tecnologías que resuelvan el problema de abastecimiento de agua con calidad de riego agrícola que cumpla con la normatividad vigente NOM-SEMARNAT-001-1996, una alternativa es el desarrollo de sistemas de tratamiento de aguas de bajo costo y fácil operación, además de esto, dichos tratamientos no deben alterar la ecología del lugar y deben ser adecuados para el tipo de zona tomando en cuenta las dimensiones así como otras características importantes como el tipo de residuos que generen además de las necesidades de construcción debido a las características peculiares del suelo.

Una alternativa es la construcción de los sistemas conocidos como Humedales Artificiales, éstos utilizan plantas vasculares, microorganismos y un sustrato para realizar la remoción de diversos contaminantes que se encuentran presentes en el agua, dichos sistemas ofrecen muchas ventajas debido a sus características de operación, remoción, mantenimiento, bajo costo y aspecto, convirtiéndolos en una atractiva solución de abastecimiento de agua para las zonas chinamperas.

En este trabajo se muestra como implementar un sistema de dichas características y los beneficios generados para los agricultores mostrando así soluciones que estén a su alcance adecuadas a las necesidades particulares.

## **2. OBJETIVOS**

### **General**

Seleccionar y proponer de manera conceptual un sistema de tratamiento que permita obtener, a partir del agua de los canales de la zona chinampera, agua con calidad para riego de hortalizas.

### **Particulares**

Determinar el tipo de sistema más idóneo, para ser construido en chinampas y que permita obtener agua para riego de hortalizas a partir de el agua contenida en los canales de Xochimilco.

Proponer el diseño de un sistema de tratamiento seleccionado de tipo humedal artificial para abastecer de 2000 L/d de agua con calidad de riego de hortalizas la Chinampas de la zona de San Gregorio Xochimilco en la ciudad de México.

Evaluar la factibilidad técnica, económica y ambiental de implementar el sistema de tratamiento seleccionado.

### 3. ANTECEDENTES

#### 3.1 La zona chinampera de la Ciudad de México

##### Importancia cultural e histórica

La Ciudad de México cuenta con diversas riquezas que abarcan aspectos históricos, económicos y culturales, en algunas de nuestras delegaciones se conservan tradiciones y costumbres que datan de la época prehispánica, un ejemplo de ello son las chinampas, que en algún momento de nuestra historia propiciaron el desarrollo de algunas destacadas culturas mesoamericanas. Se calcula que la antigüedad de las chinampas data de hace 4000 años, teniendo su máximo apogeo entre los años 1325 y 1521 (Cisneros, 2005). La palabra chinampa es de origen náhuatl y significa "seto o cerca de cañas" (Stephan y Zlotnik, 2001); Las chinampas son terrenos prácticamente hechos a mano contruidos por medio de materia orgánica en zonas inundadas de agua con un área que va de los 100 a los 2 200 m<sup>2</sup> (Rojas, 1993). Sistemas semejantes a estos han sido detectados en algunas partes de Sudamérica, sin embargo, las chinampas de Tláhuac y Xochimilco son las únicas que han prevalecido hasta la actualidad (Stephan y Zlotnik, 2001). En la Figura 1 se muestra la vista de un canal en Tláhuac.



Figura 1. Chinampas de la zona de Tláhuac

Las chinampas son sistemas casi autosuficientes y cada uno de sus componentes tiene una función primordial, cualquier alteración en alguno de éstos conlleva a una afectación general. De la ciénega se obtienen los materiales para

realizar la construcción de ésta, los lodos se utilizan para hacer los almácigos para las semillas, del mismo medio se obtiene el agualodo para ser utilizado como abono, y el agua circundante además de servir para regar ayuda a mantener la humedad adecuada para lograr una buena productividad del suelo, la chinampa cuenta con un suelo drenado el cual está constituido con los nutrientes necesarios para el buen desarrollo de los productos, en las chinampas se pueden desarrollar diferentes cultivos simultáneos (Stephan y Zlotnik, 2001).

Un componente importante de las chinampas son los Ahuejotes, que funcionan como barrera protectora del sol, como sostén para algunos cultivos y sujetan con sus raíces la chinampa para evitar el desmoronamiento (Rojas, 1993).

Otro elemento de suma importancia es el agua de los canales que circundan las chinampas, como ya se ha mencionado, porque además de ella depende que la agricultura sea independiente de la temporada (Rojas, 1993), los canales sirven además como medio de transporte para los productos y medio limitante entre parcelas.

El agua ha sido pieza fundamental en la historia de estos sorprendentes sistemas. Al grado que la escasez de éste vital líquido ha marcado de manera determinante el destino de éstos.

Después de la conquista española se transformaron las chinampas en rancherías que originaron desecamientos, agudizando los problemas hidráulicos (Cisneros, 2005). Debido a la escasez de agua a principios del siglo XX se utilizaron los manantiales de Xochimilco para abastecer de agua potable a la Ciudad de México, con el paso del tiempo los cuerpos de agua fueron insuficientes para las actividades de las chinampas (Cisneros, 2005), propiciando que el gobierno decidiera abastecer los canales con agua tratada proveniente de la planta de Aculco y finalmente de la del cerro de la Estrella, que aporta en la

actualidad una cantidad aproximada de 700 litros por segundo (Stephan y Zlotnik, 2001).

Esto logró alterar de manera significativa el ecosistema y las costumbres de las zonas agrícolas.

En la actualidad las chinampas de Xochimilco y Tláhuac son una de las pocas zonas en el Distrito Federal donde se practica la agricultura (INEGI, 2004) y son zonas protegidas por instituciones gubernamentales como la Comisión de Recursos Naturales (CORENA). En la Figura 2 se muestran en blanco y azul claro las zonas consideradas como agrícolas en el Distrito Federal.

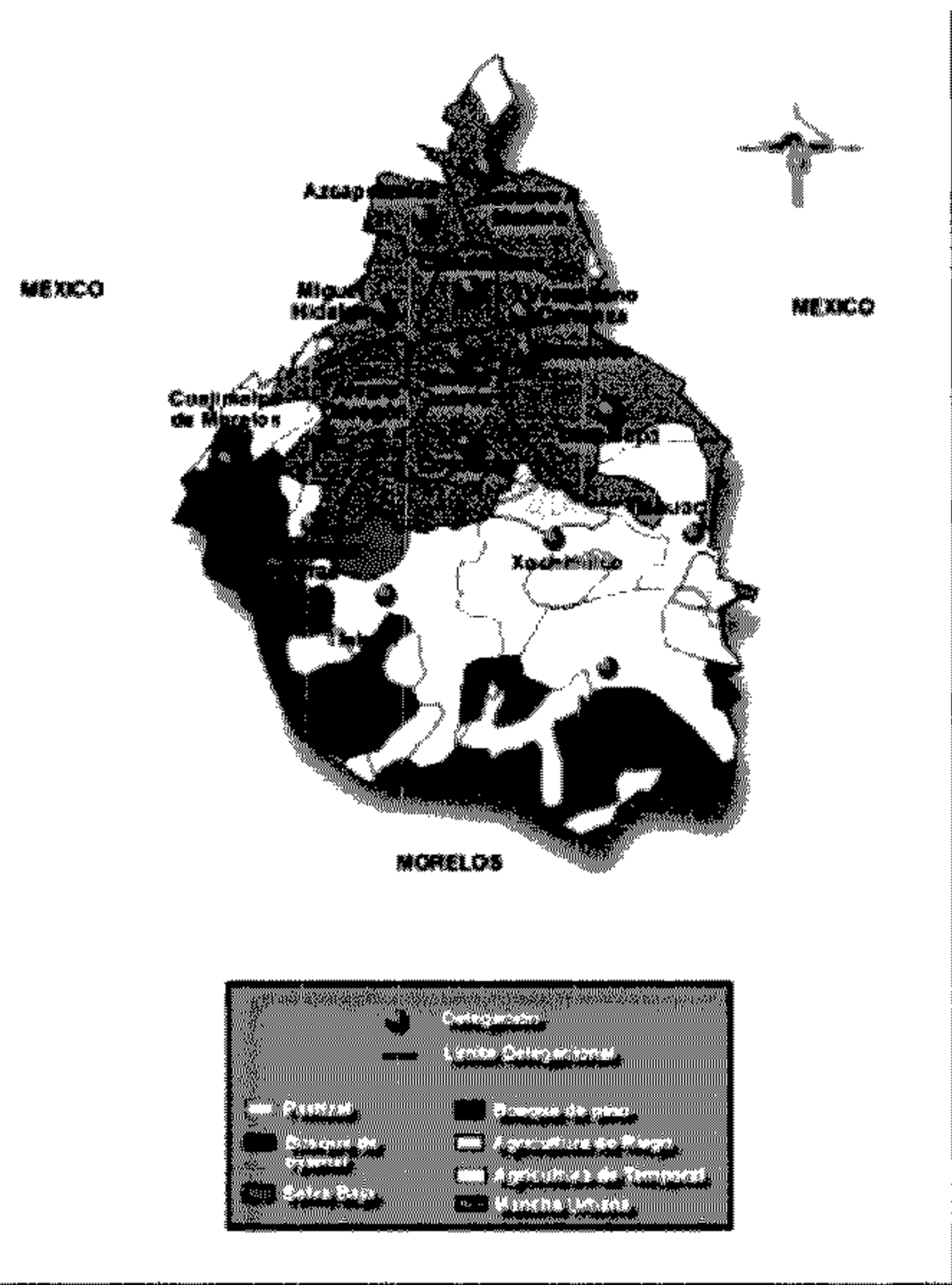


Figura 2. Zonas agrícolas del Distrito Federal  
<http://mapserver.inegi.gob.mx>

En las chinampas se desarrollan diversas actividades que constituyen una cultura muy propia del lugar. El sistema de chinampas es un sistema integrado que combina agricultura, acuacultura, ganado estabulado y uso de desperdicios (Rojas, 1993)

Los principales canales de la región de Xochimilco son Cuemanco, Apatlaco, Tlilac, Trancatitla, Tecuitetl y Canal de Chalco (Jiménez, 2004); y los principales canales de Tláhuac son el de Chalco y el Guadalupano además de el Atecuyuac y el de Amecameca, existen también en Tláhuac otros canales pequeños como el Acalota (Hernández, 2003)

La actividad agrícola en las chinampas de Tláhuac y Xochimilco es importante para el Distrito Federal, algunos de los productos han sido en su mayoría cultivados en estas zonas un ejemplo de ello es la acelga cultivada en Tláhuac que ha representado el 86% de la producción, así como el amaranto planta cultivada desde hace más de 7000 años en México que es cultivada en Xochimilco y ha representado el 90% de la producción de la ciudad (INEGI, 1988).

En Xochimilco la agricultura representa el 8.4 % del PIB de la superficie sembrada y cosechada en el Distrito Federal (INEGI, 1991).

Aunque la cuarta parte de la población mexicana se dedica a actividades rurales sólo el 1.1.% del PIB nacional pertenece a actividades agropecuarias, silvicultura y pesca (INEGI, 2003).

Para tener un panorama de la importancia de los cultivos de la zona chinampera de la Ciudad de México en la Tabla 1 se muestran los principales productos que se obtienen en las delegaciones de Tláhuac y Xochimilco y el porcentaje que representan del volumen producido en el Distrito Federal.

Tabla 1. Volumen de la producción de Tláhuac y Xochimilco en el Distrito Federal  
1990 (INEGI, 1991)

Concepto	Distrito Federal	Tláhuac	%	Xochimilco	%
Hortalizas					
Acelga	358	308	86%	50	14%
Apio	162	162	100%	-	-
Calabacita	754	94	12%	-	-
Chicharo	72 500 (miles de pesos)	72 500 (miles de pesos)	100%	-	0%
Col (repollo)	199	145	73%	54	27%
Espinaca	1034	206	20%	64	6%
Haba	1146	-	-	-	-
Papa	889	-	-	-	-
Zanahoria	1785	-	-	108	6%
Lechuga	56	-	-	26	46%
Rábano	113	29	26%	10	9%
Coliflor	1242	724	58%	20	2%
Brócoli	117	117	100%	-	-
Haba asociada	191	-	-	-	-
Otras hortalizas	103600 (miles de pesos)	53900 (miles de pesos)	52%	44800 (miles de pesos)	43%



Continuación Tabla 1. Volumen de la producción de Tláhuac y Xochimilco en el Distrito Federal 1990

Concepto	Distrito Federal	Tláhuac	%	Xochimilco	%
Granos básicos					
Elote	9773	-	-	-	-
Frijol	272	180	66%	20	7%
Maiz	29792	10796	36%	4412	15%
Maiz asociado	603	-	-	-	-
Otros granos					
Amaranto	109	6	6%	98	90%
Cebada	40	40	100%	-	-
Forrajeros					
Avena Forrajera	58223	660	1%	1290	2%
Ebo (Veza o Jaranargo)	3552	35	1%	371	10%
Cultivos perennes					
Capulin	55	5	9%	6	11%
Chabacano	23	5	22%	3	13%
Ciruela del país	143	18	13%	20	14%
Durazno	181	6	3%	34	19%
Higo	41	3	7%	12	29%
Manzana	190	5	3%	42	22%
Membrillo	48	28	58%	-	-
Nuez encarcelada	5	5	100%	-	-
Pera	171	8	5%	40	23%
Tejocote	30	-	-	-	-
Otros frutos	32300 (miles de pesos)	4750 (miles de pesos)	15%	-	-
Alfalfa verde	1978	1038	52%	-	-
Ray Grass	2669	-	-	56	2%
Veza invierno	427	56	13%	-	0%

Esto es una muestra de la poca rentabilidad que pueden tener estas actividades. El abandono del campo provoca una disminución en la productividad del campo, los problemas ambientales limitan a los campesinos y les impiden

desempeñar sus labores sobre todo cuando sus cultivos dependen del riego. Un hecho significativo es el abastecimiento de agua.

En Xochimilco, Tláhuac y el Distrito Federal a diferencia del resto del país se depende casi en su totalidad de las temporadas de lluvias, esto se muestra en la Tabla 2:

Tabla 2. Número y Superficie agrícola de ejidos y comunidades según disponibilidad de riego (INEGI, 1988)

Entidad Federativa	Total		Temporal		Riego	
	Número	Superficie Agrícola (Ha)	Número	Superficie Agrícola (Ha)	Número	Superficie Agrícola (Ha)
Estados Unidos Mexicanos	27 302	20 307 289	24 977	16 976 353	9 376	3 330 936
D.F.	37	28 096	37	28 088	1	8
Xochimilco	4	1 516	4	1 516	-	-
Tláhuac	7	1 676	7	1 676	-	-

Algunos campesinos optan por realizar los riegos con aguas residuales, sin llevar a cabo ningún tratamiento previo, con esto se incumplen las normas y se pone así en riesgo la salud de los consumidores. Esto hace necesario ofrecer a los agricultores alternativas para regar sus cultivos sin que dependan totalmente de las temporadas de lluvias.

### 3.2 Problemática abordada

En 1987 Xochimilco fue inscrito en la lista de Patrimonio Mundial, y actualmente debido al crecimiento de la mancha urbana y a otros problemas la UNESCO ha expresado su preocupación ante el riesgo que corre esta zona de perder su cualidad como Patrimonio Cultural de la Humanidad.

La problemática de las chinampas mexicanas involucra aspectos de diversa índole, su cercanía a la zona urbana, los problemas de comercialización de los productos y la invasión de terrenos entre otros, pero sin duda uno de los mayores problemas a los que enfrentan nuestras chinampas es la falta de agua de calidad, esto provoca la baja calidad de los productos, la pérdida de cosechas y finalmente el abandono de estas zonas o incluso el uso inadecuado de estos espacios.

El mal uso que se les da a las chinampas es la construcción de lugares con fines totalmente distintos a actividades agrícolas entre las que se encuentran sitios de descanso y salones de fiestas ubicados en la colonia Barrio 18 (García, 2003).

La construcción de casas (Figura 5 y 6) y canchas de fútbol (Figuras 3 y 4) en chinampas de Tláhuac y Xochimilco ha sido consecuencia del abandono de las actividades agrícolas.

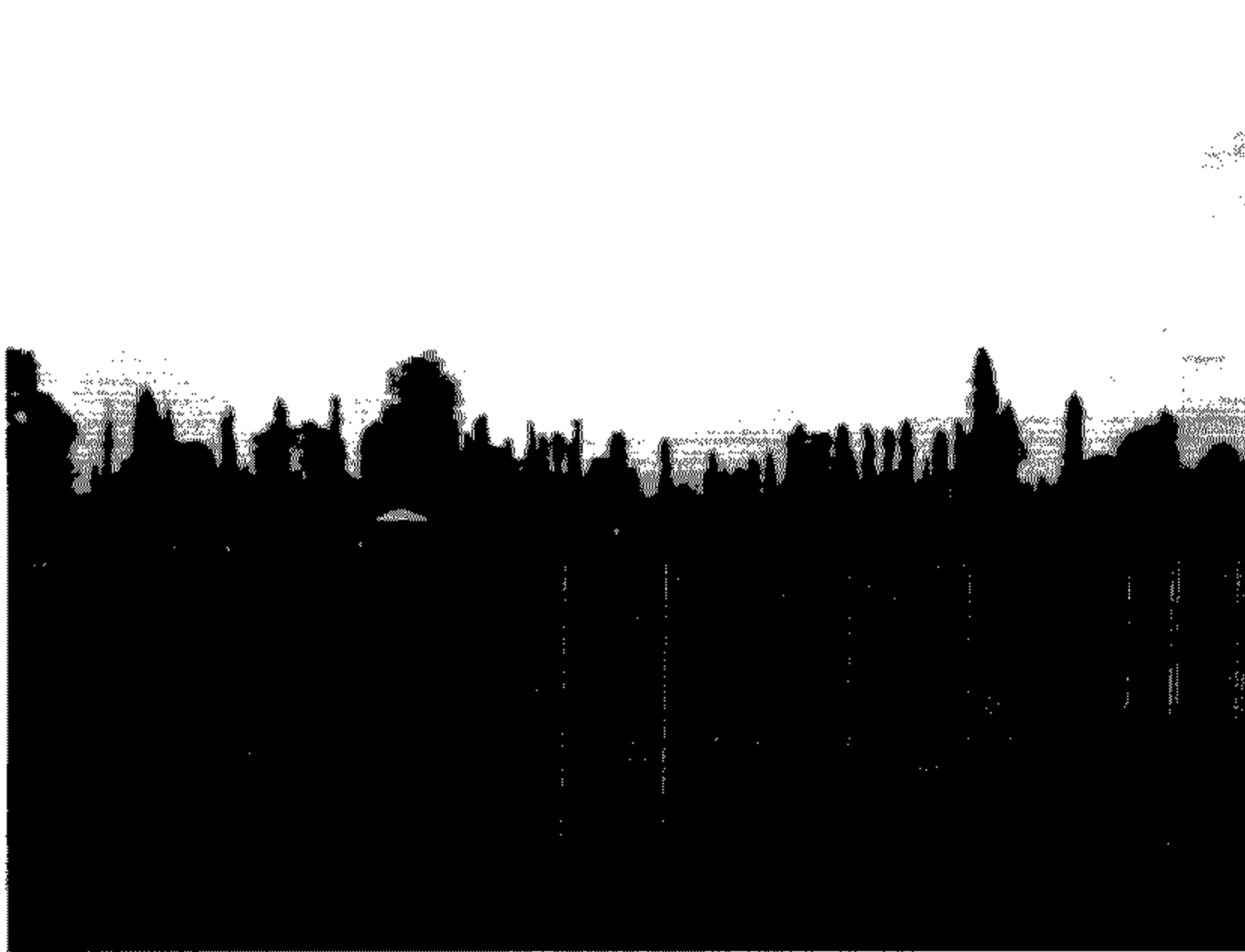


Figura 3. Campo de fútbol construido en las chinampas de Tláhuac



Figura 4. Campo de Fútbol junto a parcelas



Figura 5. Casas construidas en zonas chinamperas



Figura 6. Construcciones irregulares en chinampas de Xochimilco

### 3.2.1 Contaminación del agua

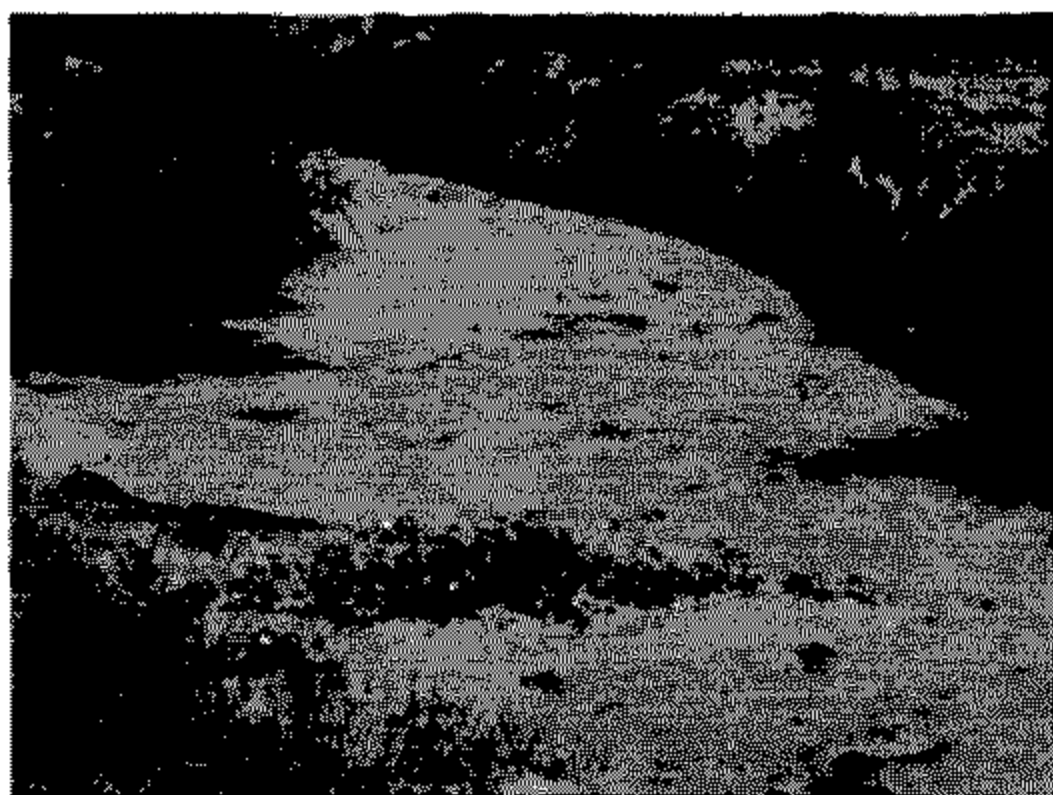
Los canales de la zona chinampera se constituyen principalmente de agua proveniente de lluvias, aguas residuales domésticas y de agua proveniente de la planta de tratamiento del Cerro de la Estrella (Gómez de León, 2003), éstos ofrecen una alternativa de riego para los agricultores, pero la calidad de esta agua incumple con la normatividad vigente (NOM-001-SEMARNAT-1996), ocasionando problemas en la calidad de los productos. El vertido de sales ocasionan serios efectos negativos, sin embargo, las sales en los suelos ocasionan grandes daños a la biota (Jiménez, 2004).

Debido a los asentamientos irregulares, no existen las instalaciones adecuadas de drenaje y otros servicios, ocasionando así que los habitantes viertan sus aguas residuales a los canales (Figura 7), y a pesar de que en estas delegaciones del sur de la zona metropolitana los contaminantes no provienen de industrias u otras actividades fuertemente dañinas (Cisneros, 2005), la calidad del agua de los canales se ve afectada por las trazas presentes provenientes de la planta de tratamiento del cerro de la Estrella, ya que contiene residuos metálicos, físicos y químicos que no son de fácil biodegradabilidad, éstos contribuyen a la escasez de oxígeno dando paso al desarrollo de microorganismos (Jiménez, 2004) originando problemas en la fauna acuática y en los cultivos. En las Figuras 8 y 9 se muestra la vista de los canales de la zona de San Gregorio.



Figura 7. Vertido de aguas contaminadas a los canales de Tláhuac.

Desafortunadamente en zonas como San Gregorio Xochimilco lugar que destaca por su producción de diversos tipos de lechuga se realizan riegos con agua de los canales, suministrada por bombas y sin tratamiento previo como se muestra en la Figura 10. Esta situación ha preocupado a los agricultores de la zona quienes se han acercado a diversas organizaciones buscando una solución que les permita continuar con sus actividades sin ocasionar daños a la salud, a sus productos y que detenga el daño a este importante ecosistema.



Figuras 8 y 9. Canales visiblemente contaminados en la zona de San Gregorio Xochimilco



Figura 10. Riego de Cultivos con agua contaminada en San Gregorio Xochimilco

En la zona de San Gregorio no solo se puede percatar a simple vista de la contaminación de los canales, sino que al estar en el lugar se percibe un olor muy fuerte a aguas negras, situación que contrasta con la tranquilidad y paisaje del lugar.

### **3.2.2 Repercusión en la agricultura**

La horticultura comprende todas las prácticas agrícolas encaminadas al cultivo de los huertos, en el cual un terreno es adaptado a producciones diversas. Las hortalizas no tienen un valor energético alto, éstas contienen pocas grasas, almidón y azúcares así como escasas proteínas (Valadez, 1994). Las hortalizas tienen un buen contenido de sales, como el hierro, el cobre y el calcio. Existen diferentes tipos de ellas entre las que destacan las raíces o tubérculos, bulbos o tallos, hojas, hortalizas para condimentación y las que son cultivadas por el uso de sus flores o semillas (Enciclopedia Británica, 1995).



Las hortalizas representan un alto contenido de agua superior al 70% y son ricas en vitaminas, minerales y fibra dietética (Chávez, 2003). En la tabla 3 se muestra el porcentaje de agua, grasa y sales que contienen algunas hortalizas cultivadas en Tláhuac y Xochimilco.

Tabla 3. Valor calórico y composición de algunas de las hortalizas.

Hortaliza	Agua %	Grasa %	Sales %	Cal/kg
Alcachofas	84	3.0	1.7	550
Calabaza	95	0.8	0.5	150
Cebolla	89	1.4	0.6	400
Col	92	1.6	0.5	250
Espinaca	92	2.2	1.8	230
Lechuga	95	1.2	0.9	180
Papas	78	2.0	1.0	800
Pimiento	93	1.2	1.5	240
Zanahoria	88	1.2	0.9	400

Debido a la gran cantidad de agua que poseen las hortalizas existe una fuerte dependencia de la calidad de ésta.

La baja calidad de los productos es una consecuencia del riego con aguas contaminadas, en Tláhuac, la CORENA sugiere no regar los cultivos con agua de los canales con agua entubada proveniente de la planta de tratamiento de Cerro de la Estrella para garantizar una mejor producción.

Algunos ejidatarios de San Nicolás Tetelco han comentado (Hernández, 2003) que el agua proveniente de los canales ha afectado la producción, disminuyendo la calidad de los productos. Además de que el agua contaminada impide actividades como la pesca en los canales.

Los agricultores de la zona de San Gregorio comentan que sus productos se ven mayormente afectados cuando el agua se muestra más contaminada, los cultivos son más pequeños y las hojas se muestran dañadas como se puede observar en la figura 11.

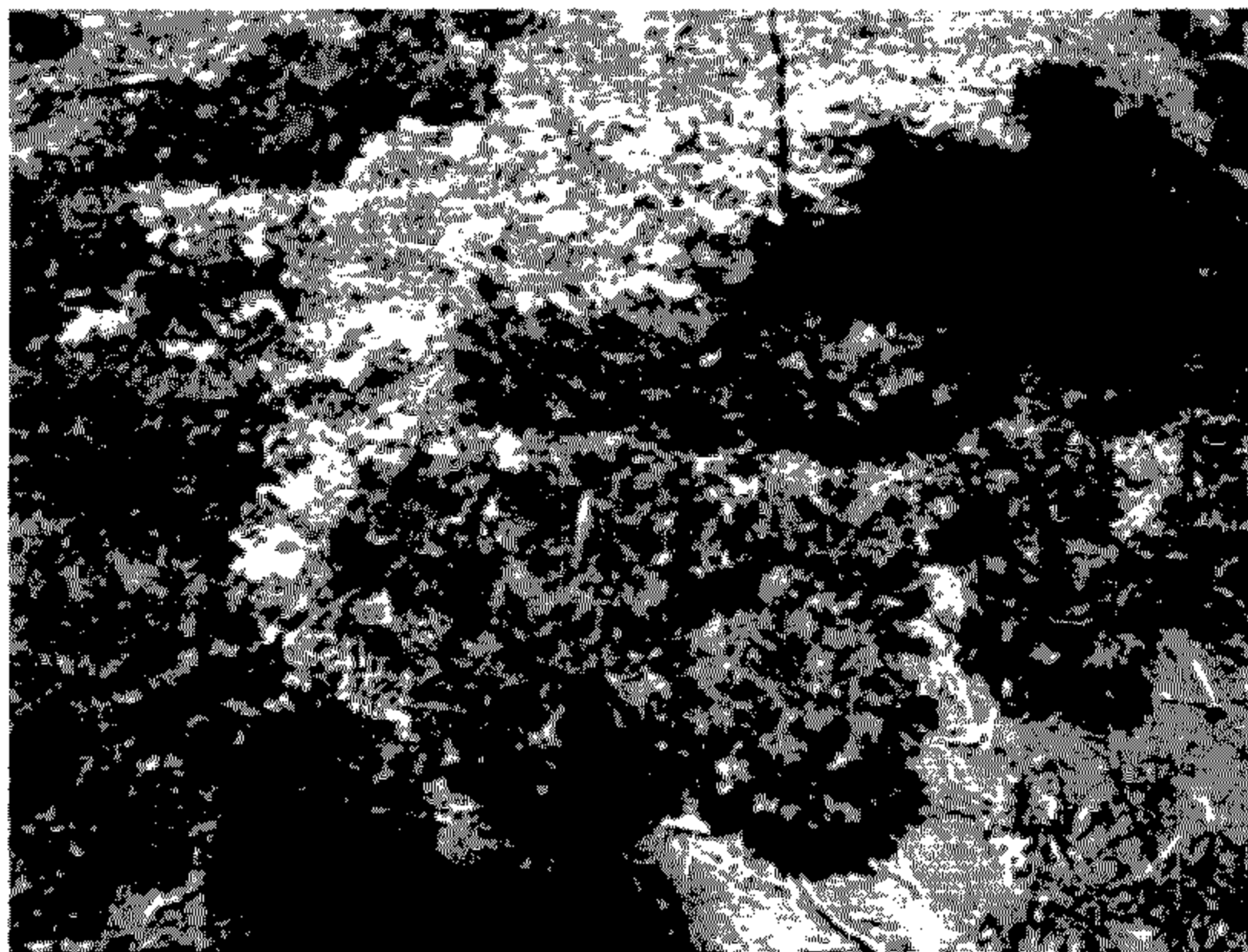


Figura 11. Lechugas dañadas en la zona de San Gregorio

Estos problemas en la calidad de los productos se deben entre otras cosas a que los metales pesados tóxicos como cadmio, plomo y zinc, se han acumulado en los suelos rompiendo el equilibrio natural presentándose en promedio en cantidades de 56.37 mg/kg de Zinc, 19.12 mg/kg de Plomo y 1.30 mg/kg de Cadmio (Jiménez, 2004). Dichos contaminantes llegan a los suelos por diferentes vías entre las cuales se encuentra el agua de riego, en el caso de las hortalizas de Xochimilco que se riegan con agua de los canales se ha encontrado que en épocas de riego la concentración de metales como plomo en las hortalizas aumenta significativamente oscilando entre los 30 mg/kg (Jiménez, 2004). Las concentraciones altas de metales alteran los tejidos de las plantas ocasionando una reducción en el crecimiento de la raíz, afectando el tallo, y sobre todo las hojas en donde se ocasiona una disfunción en el sistema de comportamiento subcelular (Mohammad, 2002), los organelos más dañados son los cloroplastos y las mitocondrias (Jiménez, 2004).

En algunos estudios se ha encontrado una concentración alta de metales en hortalizas de la zona de Xochimilco, el metal con mayor concentración es el Zinc que alcanza concentraciones de hasta 120 mg/Kg en Brócoli, Espinaca, Verdolaga y Coliflor (Jiménez, 2004).

Pero más allá de este daño se encuentran otros problemas, como el hecho de que hay plantas que no se ven perjudicadas por el alto contenido de metales como los rábanos, pero que al ser ingeridas dañan al ser humano (Jiménez, 2004).

El riego de hortalizas con aguas contaminadas propicia el desarrollo de microorganismos dañinos en las plantas, ya que éstas se contaminan principalmente por los contaminantes contenidos en el suelo y el agua de riego utilizada, se ha demostrado que las superficies de vegetales regadas con aguas residuales dan recuento de organismos coliformes mayores a las regadas con aguas puras (Seoáñez, 1999b) Los organismos fitopatógenos ocasionan en las plantas problemas de crecimiento debido a que producen sustancias que estimulan o retardan la producción de reguladores e inhibidores del crecimiento por parte de la planta, ocasionando crecimiento excesivo o deficiente así como malformaciones en tallos y hojas (Agrios, 1991).

### **3.2.3 Problemas a la salud pública**

La falta de higiene, lavar frutas y verduras conlleva a la transmisión de microorganismos patógenos por medio de este tipo de alimentos, situación que propicia un mayor número de enfermedades.

Las hortalizas se pueden ver contaminadas por diversos factores entre los que se encuentran el suelo, los fertilizantes orgánicos, el aire, animales y el agua ésta última es una fuente importante de contaminación, los microorganismos

patógenos transmitidos provocan diversas enfermedades como fiebre, tifoidea, paratifoidea, disentería y cólera (Chávez, 2003).

Las huertas regadas con agua de los canales, sirven de transporte para microorganismos enterográsticos como: *Salmonella*, *Vibrio*, *Estreptococos* y *Enterobacterias* (Muller, 1991). La *Salmonella* penetra casi siempre mediante la ingesta de alimentos contaminados y los cultivos son medios muy apropiados para su crecimiento (Chávez, 2003)

Los cationes de metales pesados como cadmio, plomo y zinc en las hortalizas representan una amenaza para la salud ya que puede entrar a la cadena alimenticia y al medio ambiente (Jiménez, 2004).

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 Características del agua de los canales de la zona chinampera

Como ya se mencionó con anterioridad, la contaminación de los canales de las chinampas puede percibirse a simple vista y de manera olfativa, así como en la baja calidad de los productos regados con dicha agua, además de esto existen estudios que muestran la cantidad de contaminantes presentes en esta agua. En la tabla 4 y 5 se enlistan los parámetros que nos servirán de indicadores de contaminación y sus valores en Tláhuac y Xochimilco respectivamente.

Tabla 4. Parámetros del agua de San Juan Ixtayopan en Tláhuac (Cornejo, 2003).

Parámetro	Carga contaminante	Unidades
Ph	7.43	
Grasas y Aceites	162.4	mg/L
Alcalinidad	395.28	mg/L
DQO	1825.2	mg/L
DBO <sub>5</sub>	946	mg/L
Sólidos totales	2388	mg/L
SST	1140	mg/L
Nitrógeno Total	129.84	mg/L
Fósforo total	17.13	mg/L
Fosfato Total	105.18	mg/L
Cobre	0.245	mg/L
Arsénico	0.005	mg/L
Cadmio	0.3	mg/L
Fierro	5.81	mg/L

Tabla 5. Calidad del agua de la Zona San Gregorio Xochimilco Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica

Parámetro	Unidades	Datos encontrados
PH		8.6
Turbidez	UNT	31
Alcal. Total	mg/L	451
ALCA. la fenol	mg/L	19
Dureza T.	mg/L	203
Carbonatos	mg/L	35
Bicarbonatos	mg/L	414
Cond. Eléc.		1093
Cloruros	mg/L	143
Sólidos T.	mg/L	957
Sólidos disueltos	mg/L	721
Sólidos suspendidos	mg/L	53
Sol. Sedimentables	mg/L	0
Nitrógeno amoniacal	mg/L	4
Nitratos	mg/L	1
Fósforo Tot.	mg/L	4
Fosfatos Tot.	mg/L	7
Nitr. Nitritos	mg/L	0.22
Calcio Tot.	mg/L	37
Magnesio Tot.	mg/L	26
Sodio Tot.	mg/L	218
Potasio Tot.	mg/L	28
Fierro tot.	mg/L	1
Manganeso tot.	mg/L	0.0651
Plomo	mg/L	0.0500
Cadmio	mg/L	0.0183
Mercurio	mg/L	0.0002
Arsénico	mg/L	0.0009
Cromo	mg/L	0.0080
Coliformes totales	col/100ml	60037
Coliformes fecales	col/100ml	51835

Tabla 6. Parámetros determinados en el agua de la zona agrícola de Xochimilco

Parámetro	Unidades	Concentración
DBO <sub>5</sub>	mg/L	144 – 159.5
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	10000 - 20000
Ph		7.5 - 8.5
Grasas y Aceites	mg/L	373.7 – 494
Sólidos suspendidos	mg/L	200
Sólidos disueltos totales	mg/L	700 – 1554.5

.....

## 4.2 Normatividad

### Agricultura ecológica

La secretaría del medio ambiente establece que en los suelos de conservación se deben llevar a cabo los métodos sostenibles de producción agrícola, que “recuperen, conserven los suelos, disminuyan la contaminación de las aguas, promueva la diversificación de cultivos, el cuidado y conservación de los recursos naturales, fomentando el desarrollo de mercados ecológicos para beneficio del productor y del consumidor así como el desarrollo del sector rural del Distrito Federal” esto está establecido en la norma NADF-002-RNAT-2002, que establece las condiciones para la agricultura ecológica en el suelo de conservación del distrito federal, en esta norma se establece que las prácticas de riego agrícola deben obedecer a las normas oficiales mexicanas correspondientes (NOM-001-SEMARNAT-1996), al cumplir con una serie de lineamientos incluyendo la calidad del agua de riego, el agricultor podrá obtener el certificado de cumplimiento de la norma ambiental y así la autorización del uso del Sello Verde en productos agrícolas en fresco y/o procesados publicado en la gaceta oficial el día 27 de diciembre de 2004.

## **Lodos y biosólidos**

Existen también otras normas como la NOM-004-SEMARNAT-2002 que establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final, esta norma se refiere a los lodos generados por actividades como desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, así como de la operación de plantas potabilizadoras y de tratamiento de aguas residuales, por ello es importante considerar estos límites para elegir un sistema de tratamiento adecuado. En esta norma se establecen los límites máximos permisibles para metales como arsénico (41 mg/Kg), cromo (1200 mg/Kg), cadmio (39 mg/Kg), cobre (1500 mg/Kg), plomo (300 mg/Kg), mercurio (17 mg/Kg), níquel (420 mg/Kg) y zinc (2800 mg/Kg) y los límites máximos para patógenos y parásitos, estos están medidos como coliformes fecales (NMP/g en base seca), huevos de helminto (huevos/g en base seca) y *salmonella spp* (NMP/g en base seca) dependiendo del contenido de estos parámetros se clasifican los biosólidos en A, B y C, dependiendo de esto y de su contenido en metales se considera su aprovechamiento y disposición, éste puede ser en usos forestales, de suelo o agrícola. Al momento de elegir un sistema de tratamiento de aguas es importante considerar la generación de lodos y el tratamiento que se les de a éstos.

## **Calidad del agua para riego agrícola**

De la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 Publicada en Diario Oficial de la Federación de fecha 6 de enero de 1997 se obtuvieron los límites máximos permisibles que servirán para conocer los valores a los que se debe llevar el agua. La concentración de contaminantes básicos, metales pesados y cianuros para las descargas de aguas residuales a aguas y bienes nacionales, no debe exceder el valor indicado como límite máximo permisible en las Tablas 7 y 8. El rango permisible de pH es de 5 a 10 unidades.



En las Tablas 7 y 8 se muestran los límites máximos permisibles y los parámetros considerados para metales y contaminantes básicos.

Tabla 7. Especificaciones sobre la calidad del agua contenida en la NOM-001-SEMARNAT-1996 para metales

Límites Máximos permisibles para metales y cianuro																				
Parámetros (miligramos por litro)	Ríos						Embalses Naturales y Artificiales				Aguas Costeras						Suelo Uso en riego agrícola (A)		Humedales Naturales	
	Uso en riego Agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de la vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (B)		PM	PD	PM	PD
	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.5	0.1	0.1	0.2
Cianuro	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4	6.0	1.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4.0	6.0
Cromo	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	2	2	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	0.5	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10	0.2	0.2
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

Tabla 8. Especificaciones sobre la calidad del agua contenida en la NOM-001-SEMARNAT-1996 para contaminantes básicos.

Límites Máximos permisibles para contaminantes Básicos																				
Parámetros (miligramos por litro)	Ríos						Embalses Naturales y Artificiales				Aguas Costeras						Suelo Uso en riego agrícola (A)		Humedales Naturales	
	Uso en riego Agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de la vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (B)		PM	PD	PM	PD
	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD
Temperatura (°C)	NA	NA	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	NA	NA	40	40
Grasas y aceites	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25
Materia flotante	Ausente		Ausente		Ausente		Ausente		Ausente		Ausente		Ausente		Ausente		Ausente		Ausente	
Sólidos sedimentables	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	NA	NA	1	2
Sólidos Suspendidos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	NA	NA	75	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	NA	NA	75	150
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	NA	NA	NA	NA	15	25	NA	NA	NA	NA
Fósforo total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	NA	NA	NA	NA	5	10	NA	NA	NA	NA

El indicador de contaminación por patógenos son las coliformes fecales. El límite máximo permisible para las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, así como las descargas vertidas a suelo (uso en riego

agrícola), es de 1,000 y 2,000 como número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 ml para el promedio mensual y diario, respectivamente. Para determinar la contaminación por parásitos se toma como indicador los huevos de helminto. El límite máximo permisible para las descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola), es de un huevo de helminto por litro para riego no restringido, y de cinco huevos por litro para riego restringido.

En la tabla 9 se muestra el porcentaje de remoción requerido en las aguas de los canales para lograr el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Tabla 9. Porcentaje de remoción requerido para cumplir la NOM-001-SEMARNAT-1996

	Unidades	Parámetros encontrados en la zona	Límite máximo permisible especificado en la norma	Porcentaje de remoción requerido %
Temperatura (°C)	°C	20	40	-
Grasas y aceites	mg/L	373.5 – 494	15	96
Materia flotante		-	Ausente	-
Sólidos sedimentables	mg/L	700 - 1554.5	1	99
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	200	75	62
DBO <sub>5</sub>	mgO <sub>2</sub> /L	144 - 159.5	75	53
Nitrógeno Total	mg/L	5 - 129.8	40	69
Fósforo Total	mg/L	4 - 17.13	20	-
Arsénico	mg/L	0.005	0.2	-
Cadmio	mg/L	0.3	0.2	33
Cianuro	mg/L	--	2.0	-
Cobre	mg/L	0.245	4.0	-
Cromo	mg/L	0.008	1.0	-
Mercurio	mg/L	0.0002	0.01	-
Niquel	mg/L	--	2.0	-
Plomo	mg/L	0.05	0.5	-
Zinc	mg/L	--	10.0	-
Coliformes Fecales	NMP/100mL	10000-50000	1000-2000	96
Huevos de Helminto	Huevo/L	--	1	-

### 4.3 Sistemas de Tratamiento de agua

Existen diferentes procesos de tratamiento de agua, para realizar la selección adecuada es necesario tomar en cuenta criterios ecológicos, económicos y técnicos que se adecuen a las condiciones del lugar (Metcalf, 1991).

Los tratamientos primarios son principalmente los que involucran técnicas físicas y químicas. En los tratamientos de tipo secundario intervienen procesos biológicos. Los tratamientos terciarios, consisten en los métodos de coagulación/floculación, sedimentación, filtración de arena y desinfección (Dumars, 1995).

La elección del tren de tratamiento debe basarse principalmente en los porcentajes de remoción esperados, después de tomar en cuenta este factor se deben considerar los costos, y finalmente las características de la zona de chinampas, debido a que esta zona cuenta con determinadas características se debe elegir un sistema de tratamiento de aguas que no altere la ecología ni apariencia de la zona, hay que tener en cuenta las condiciones del suelo en el cual no se pueden construir estructuras muy complicadas porque no se cuenta con los servicios adecuados como electricidad. Así mismo una alternativa es aquella utilice los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren normalmente en la naturaleza, estos obedecen a las características de las llamadas ecotecnologías (Miranda, 2001).

Los sistemas biológicos se encuentran clasificados dependiendo de si el proceso se lleva a cabo en presencia de oxígeno, Así podemos hablar de procesos aerobios y anaerobios (Ronzan, 1995)

En la tabla 10 (Seoáñez, 1990) se muestra una comparación de costos de diferentes tipos de tratamientos que involucran procesos biológicos.

Tabla 10. Costos de Construcción y Mantenimiento (Seoánez, 1990)

Sistema	Construcción	Mantenimiento
Fosa séptica	P	P
Lecho filtrante	M	M
Zanja filtrante	M	M
Humedal	P	P
Tanque Himhoff o similar	P	P
Lecho bacteriano	I	M
Lecho de turba	P	M
Filtro de arena	M	M
Riego por encharcamiento	P	I
Infiltración-percolación	P	P
Escorrentía superficial	P	P
Biodiscos	I	M
Aireación prolongada	I	M
Lagunas aireadas	P	P
Lagunas aerobias	P	P
Lagunas anaerobias	P	P
Lagunas facultativas	P	P
Tratamiento físico-químico	I	M
Pozo Filtrante	M	M
Riego por aspersión	I	I

P = Poco

I = Intermedio

M = Mucho

Las lagunas aireadas, aerobias, anaerobias facultativas, las fosas sépticas, los humedales y los tanques Himhoff, así como la infiltración percolación y los sistemas de escorrentía superficial nos ofrecen ventajas en cuanto a los costos de operación y mantenimiento pero también es importante considerar aspectos como la facilidad de operación y mantenimiento. En la tabla 11 se muestra la comparación con diferentes sistemas.

Tabla 11. Tipo de mantenimiento empleado (Seóñez, 1990)

Sistema	Funcionamiento	Personal	Control	Frecuencia del control
Fosa séptica	MS	P	P	P
Lecho filtrante	S	P	P	P
Zanja filtrante	S	P	P	P
Humedal	MS	P	I	M
Tanque Himhoff o similar	S	P	P	P
Lecho bacteriano	C	M	M	M
Lecho de turba	S	I	P	I
Filtro de arena	S	I	I	I
Riego por encharcamiento	S	I	I	I
Infiltración-percolación	S	P	P	I
Escorrentía superficial	S	I	I	M
Biodiscos	C	M	M	M
Aireación prolongada	MC	M	M	M
Lagunas aireadas	C	I	M	I
Lagunas aerobias	S	P	I	I
Lagunas anaerobias	S	P	I	I
Lagunas facultativas	S	P	I	I
Tratamiento físico-químico	MC	M	M	M
Pozo Filtrante	MS	P	I	I
Riego por aspersión	C	M	M	M

MS = Muy Sencillo

S = Sencillo

C = Complicado

MC = Muy complicado

P = Poco

I = Intermedio

M = Mucho

Tomando en cuenta este aspecto se puede concluir que las fosas sépticas, los humedales, los pozos filtrantes, las lagunas y tanque Himhoff siguen ofreciendo ventajas sobre otros tipos de sistemas que se complican como los sistemas fisicoquímicos o riego por aspersión.

Otro aspecto importante es el área que ocuparía el sistema, en la zona chinampera no se pueden construir grandes estructuras y cabe destacar que el ocupar un área grande implica mayores costos y posibles pérdidas en cuanto a cosechas. En cuanto a esto podemos concluir que las fosas sépticas, los sistemas tipo lecho de turba, tratamientos fisicoquímicos y los tanques himhoff son muy convenientes. Aunque los demás sistemas ocupan también áreas convenientes esta comparación se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Necesidades de Superficie por habitante

Sistema	Superficie necesaria (m <sup>2</sup> por habitante)	Sistema	Superficie necesaria (m <sup>2</sup> por habitante)
Fosa séptica	0.4 - 0.6	Escorrentia superficial	6 - 10
Lecho filtrante	2.2 - 2.8	Biodiscos	5 - 7
Zanja filtrante	6 - 6.5	Aireación prolongada	2 - 8
Humedal	2.5 - 9	Lagunas aireadas	1 - 3
Tanque Imhoff o similar	0.05 - 1	Lagunas aerobias	4 - 7
Lecho bacteriano	4 - 7	Lagunas anaerobias	4 - 7
Lecho de turba	0.6 - 1	Lagunas facultativas	2 - 14
Filtro de arena	1.2 - 10	Tratamiento físico-químico	0.1 - 0.2
Riego por encharcamiento	10 - 30	Pozo Filtrante	1 - 10
Infiltración-percolación	2 - 10	Riego por aspersión	8 - 10

Considerando las características de la zona es conveniente utilizar ecotecnologías, se deben seleccionar solo los sistemas que pudieran no alterar de manera negativa la ecología del lugar.

Tomando en cuenta la remoción de los contaminantes más significativos de acuerdo a las características del agua se realiza una comparación en la tabla 13.

Tabla 13. Porcentajes de remoción (Miranda, 2001, Seoáñez, 1990)

Tipo de Tratamiento	Reducción en %		
	DBO	Sólidos	Bacterias
Fosa Séptica	20-60	50-90	10-90
Lecho percolador	80-95	70-92	90-95
Lodos activados	85-90	85-90	90-98
Lagunas de oxidación	72	77	99.9
Filtros de suelos o Pozo filtrante	90-95	85-90	95-99.9
Escorrentía superficial	85-90	80-90	80-98
Riego	95-98	95-99	99
Infiltración	90-95	95-98	99
Humedales artificiales	90-95	85-90	98-99.9
Biodiscos	70-85	80-98	80-90

La remoción de contaminantes es un criterio de selección básico, pero es muy importante también tomar en cuenta que se destinará a la obtención de agua para riego agrícola y los campesinos no cuentan con los suficientes recursos económicos pero sí con mano de obra y buena disposición de espacio. El tratamiento por Fosas sépticas ofrece ventajas de bajo costo, poca superficie por habitante y poco mantenimiento pero su rendimiento de remoción es bajo. Los humedales artificiales ofrecen una buena eficiencia de remoción, y es posible llevar el agua a la calidad deseada especificada en la norma tomando en cuenta la posible carga contaminante del influente. Otras ventajas que ofrecen los humedales artificiales es su integración al paisaje y bajo consumo de energía (Miranda, 2001).

### 4.3.1 Humedales Artificiales

Los humedales artificiales (HA) son áreas saturadas con agua en los cuales existe una vegetación adaptada y un material de soporte con un diámetro específico (Mander y Jenssen, 2002) en el cual se encuentran adheridas bacterias que llevan a cabo junto con la planta y el sustrato la remoción de diversos contaminantes (Figura 12), usualmente el objetivo de estos sistemas es reducir las concentraciones de la demanda biológica de oxígeno ( $DBO_5$ ), sólidos suspendidos y contaminantes básicos del agua, también se logran remover patógenos y metales pesados (Hammer, 1989, Millan, 2000).

En un humedal artificial intervienen procesos físicos, químicos y biológicos, mejorando así la calidad del agua. Los humedales artificiales están constituidos principalmente por un material de soporte, microorganismos y plantas vasculares, son sistemas que están diseñados bajo condiciones específicas para tratar aguas residuales (Miranda, 2001) y estas dependen de las características del agua, tanto del influente como del efluente que se espera, del clima y de las condiciones edafológicas del lugar.

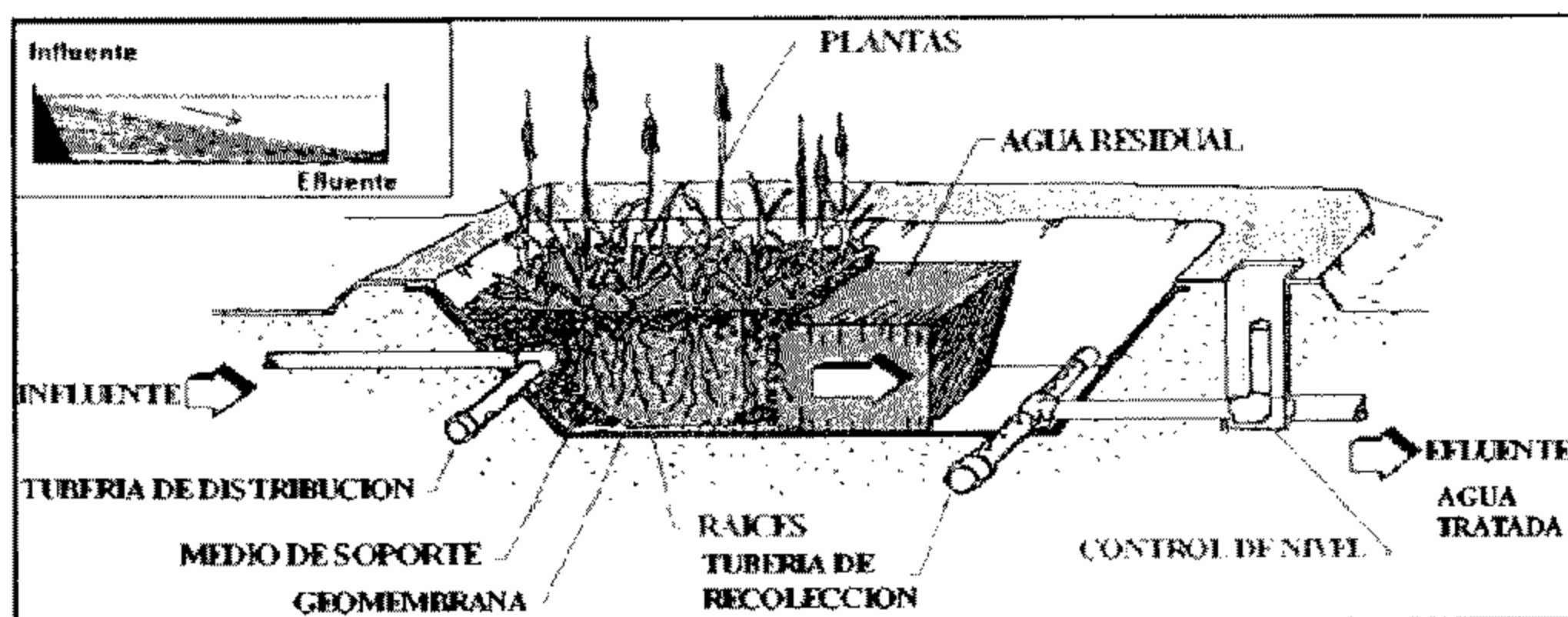


Figura 12. Composición de un HA (Miranda, 2001)

Existen diferentes clasificaciones para los humedales artificiales, las más generales son humedales de flujo superficial y flujo subsuperficial, así como



también en humedales de flujo horizontal, vertical e híbridos de estos arreglos depende en muchos casos la eficiencia del humedal.

Debido a las ventajas que ofrecen los humedales artificiales se vuelven sistemas muy atractivos para tratar aguas con características que poseen las aguas de Xochimilco.

Los HA se pueden clasificar dependiendo del arreglo en que el influente y las plantas se encuentren en los sistemas (Ramírez, 1998) o bien en el tipo de flujo. Los humedales de plantas emergentes se pueden clasificar en humedales de flujo libre superficial en el cual el agua fluye por encima del lecho y humedales de flujo subsuperficial en los cuales el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del lecho, estos últimos presentan ciertas ventajas como mayor resistencia a bajas temperaturas, menor cantidad de olores así como una menor necesidad de área.

Otra clasificación deriva de la manera en cual es introducido el influente, en los humedales de flujo vertical (HAFV) el agua es alimentada sobre la superficie y fluye verticalmente debido a que el tratamiento es por gravedad a través del sustrato (Miranda, 2001), en los humedales de flujo horizontal el influente es alimentado desde el principio del sistema mediante un tubo perforado o una canaleta (Ramírez, 1998)

Las eficiencias de remoción que ofrece un Humedal artificial son altas en muchos de los casos, el parámetro más utilizado para medir la eficiencia de este tratamiento es la  $DBO_5$ , en algunos lugares se ha logrado un remoción de 85 a 89% y 99 a 98 % para microorganismos patógenos. En las tablas 14 y 15 se muestran los porcentajes de remoción que ofrecen los humedales artificiales.

Tabla 14. Tabla de porcentajes de remoción de contaminantes para un humedal artificial (Seoáñez, 1999b)

Parámetro	Remoción del Humedal
DBO <sub>5</sub>	96%
DQO	92%
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	90-94%
NO <sub>3</sub>	
N <sub>TOT</sub>	23%
P(b)	63%
SST	Regular
Bacterias	99

Tabla 15. Porcentajes de remoción en humedales horizontales de flujo subsuperficial (Montovi. 2003, Solano y Soriano. 2004)

Parámetro	% de Remoción
Sólidos Totales Suspendidos	90.8
COD	91.9
DBO <sub>5</sub>	97.7
N <sub>TOT</sub>	48.5
N <sub>ORGÁNICO</sub>	79.1
P <sub>TOT</sub>	60.6
Sulfatos	51.6
Cobre	79.4
Niquel	58.6
Plomo	69.6
Zinc	85.7
Cadmio	23.7
Cromo	51.6
Coniformes Totales	99.6
<i>E. Coli</i>	99.7
Fecales Streptococci	98.8

En la tabla 16 se muestra el porcentaje de remoción que ofrecen los humedales de flujo horizontal y vertical

Tabla 16. Comparación de porcentajes de remoción de contaminantes en un humedal de flujo horizontal y flujo vertical (Miranda, 2001)

Tipo de sistema	DBO	DQO	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub>	N <sub>TOT</sub>	P <sub>(b)</sub>	SST	Bacterias
HAFH	80-90	70-80	20-30	95	39-51	30-50	80-88	99.9
HAFV	96	92	90-94		23	63	Regular	Buena

En base a los datos de contaminación en los canales y a los porcentajes que ofrece el humedal se obtiene la tabla 17.

Tabla 17. Porcentajes de remoción requeridos

Parámetro		Porcentajes requeridos	Porcentaje que remueve el humedal
Temperatura (°C)	°C	-	-
Grasas y aceites	mg/L	96	-
Materia flotante		Cumple la norma	-
Sólidos sedimentables	mg/L	99	90
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	62	90.8
DBO <sub>5</sub>	mgO <sub>2</sub> /L	53	96
Nitrógeno Total	mg/L	69	39-90
Fósforo Total	mg/L	Cumple la norma	60.6
Arsénico	mg/L	Cumple la norma	--
Cadmio	mg/L	33	23.7
Cianuro	mg/L	--	
Cobre	mg/L	Cumple la norma	79.4
Cromo	mg/L	Cumple la norma	51.6
Mercurio	mg/L	Cumple la norma	
Niquel	mg/L	Cumple la norma	58.6
Plomo	mg/L	Cumple la norma	69.6
Zinc	mg/L	Cumple la norma	85.7
Coliformes Fecales	NMP/100mL	96	99
Huevos de Helminto	H/L	-	-

El humedal elimina la mayoría de los contaminantes, aunque para remover sólidos es necesario un tratamiento previo como rejillas. Los metales no muestran

una presencia significativa, pero se acumulan en el suelo y es conveniente eliminarlos cuando están en el agua para evitar transferencia a las plantas.

La carga de  $\text{DBO}_5$  en el influente es un parámetro importante ya que con ella se determinan la contaminación del carbono biodegradable, y para evitar equivocaciones conviene realizar pruebas de demanda química de oxígeno (DQO) o demanda de oxígeno total (DOT) (Ronzan y Dapena, 1995). A diferencia de la  $\text{DBO}_5$  la DQO no forma parte de la normatividad pero también es importante para conocer ya que la relación  $\text{DQO}/\text{DBO}_5$  indica la biodegradabilidad del agua.

Los humedales artificiales ofrecen una buena remoción de patógenos. Debido a que los microorganismos patógenos son uno de los problemas de regar con esta agua, es conveniente utilizar estos sistemas de tratamiento tipo humedal artificial para disminuirlos (Whitney y Hayden, 2001).

Los HA ofrecen muchas ventajas sobre otros sistemas, pero una de las más importantes es que no generan lodos, lo cual resulta muy conveniente debido a que esto simplifica el proceso de tratamiento y permite cumplir la normatividad vigente en cuanto a lodos y biosólidos. Dependiendo de la hidráulica del humedal (flujo subsuperficial) se pueden eliminar olores y animales como moscas y mosquitos, esto también nos ofrece ventajas por sobre otros sistemas como fosas sépticas.

Para saber qué técnicas de caracterización se deben utilizar para el análisis del agua a tratar se deben consultar datos registrados con anterioridad de esa misma agua o bien de agua con procedencia similar.

#### 4.3.2 Información necesaria para la realización del diseño e implementación de un humedal artificial

En la construcción de un humedal intervienen factores importantes de diseño como el tiempo de retención hidráulica, profundidad, área, cantidad de DBO<sub>5</sub> en el influente, carga de agua a la entrada. Los parámetros necesarios para la construcción de un Humedal Artificial (Hammer, 1989) son tiempo de retención hidráulico, área total, carga de DBO<sub>5</sub> en el influente, profundidad del agua, constante de rapidez de remoción de contaminantes, área de sección transversal y el flujo del influente.

#### Ecuaciones involucradas en el diseño

Área superficial total

$$As = \frac{Fv * (\ln Ci - \ln Ce)}{Kt * h * n}$$

*Ci* = concentración de DBO<sub>5</sub> del influente, (mg / L)

*Ce* = concentración de DBO<sub>5</sub> de efluente, (mg / L)

*Kt* = constante de primer orden, dependiente de la temperatura, (1 / día)

*l* = longitud del lecho, (m)

*h* = profundidad del lecho en la sección inicial del sistema, (m)

*n* = porosidad del lecho, (adimensional)

*Fv* = flujo volumétrico, (m<sup>3</sup> / d)

*As* = área superficial

La porosidad (Seoáñez, 1999a) se obtiene por medio de:

$$n = 100 * \left( 1 - \frac{\text{Densidad Aparente}}{\text{Densidad Real}} \right)$$

La constante *K<sub>t</sub>* se calcula de la siguiente manera:

$$K_t = K_{20} * (1.1^*)^{T-20}$$

Tiempo de retención hidráulico:

El humedal será de tipo rectangular con descarga al final del sistema, por lo tanto:

$$THR = \frac{l * a * n * h}{fv}$$

$a = ancho$

$l = largo$

Balance Global del agua

$$\frac{dV}{dt} = (f_{vi} + P) - (f_{ve} + ET + I)$$

$\frac{dV}{dt}$  = volumen de acumulación en el sistema,  $m^3 / año$

$f_{vi}$  = flujo volumétrico anual,  $m^3 / año$

$P$  = volumen de precipitación anual,  $m^3 / año$

$f_{ve}$  = flujo volumétrico anual que sale del sistema,  $m^3 / año$

$ET$  = volumen de evapotranspiración,  $m^3 / año$

$I$  = volumen de infiltración,  $m^3 / año$

## **5. ESTRATEGIA DE TRABAJO**

### **5.1 Planeación**

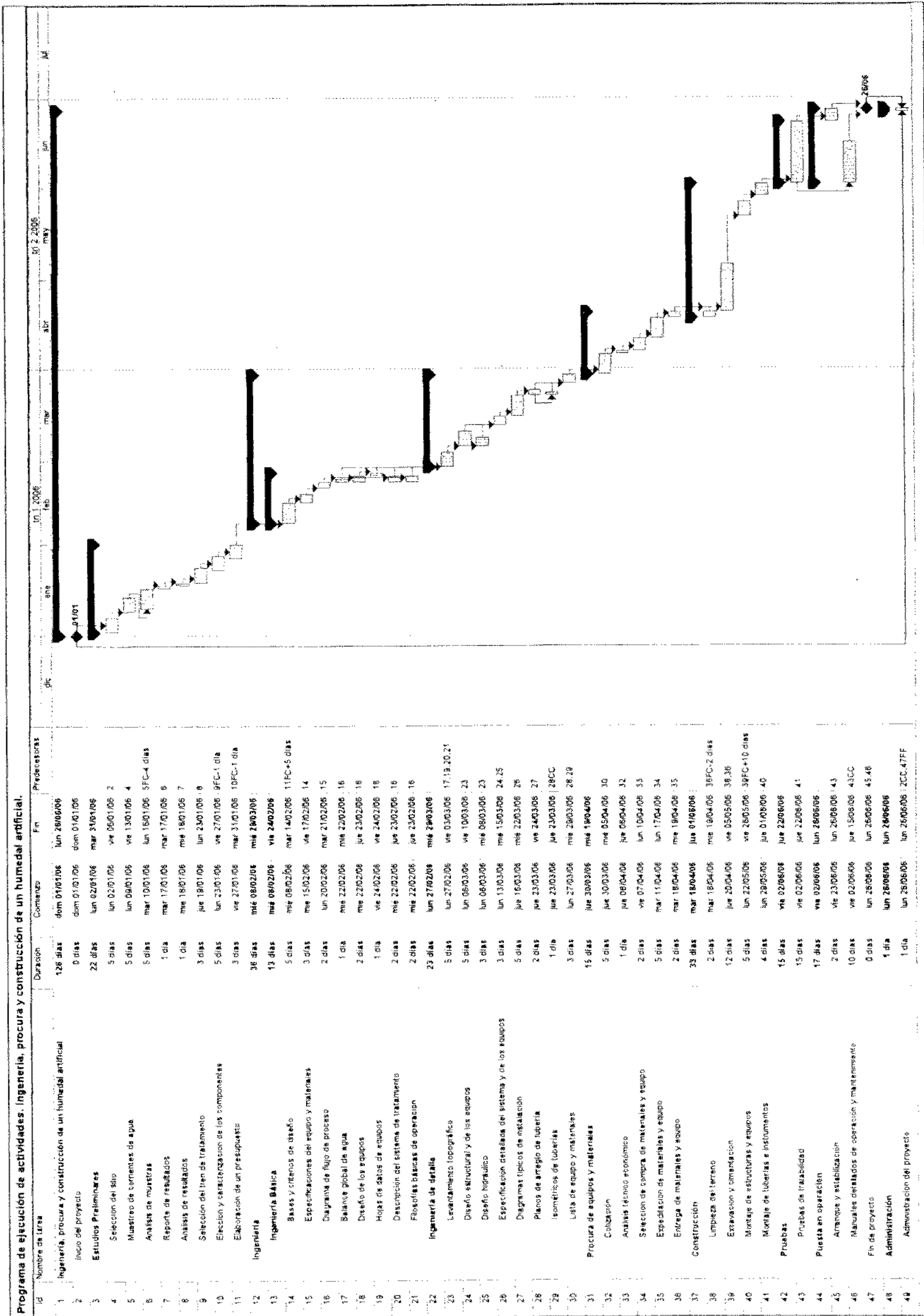
Elegir una estrategia de ejecución nos permite lograr los objetivos de todo proyecto, en ésta deben involucrarse los recursos y la extensión del proyecto para tomar las mejores decisiones, para ello es necesario llevar a cabo una planeación que considere elemental definir el proyecto y sus objetivos, identificar sus problemas, seleccionar la estrategia a seguir, estructurar el desglose del trabajo, organizar y codificar un programa de ejecución en el que incluya un presupuesto y pronóstico (Granados, 2004).

Este proyecto consiste en la elaboración de un estudio para generar una propuesta de tratamiento de aguas que resuelva de manera técnica la problemática de falta de agua para riego agrícola en la zona de Xochimilco, para ello se cuenta con un terreno aportado por los agricultores de la zona, mano de obra, una bomba hidráulica que actualmente es utilizada sustraer agua de los canales y los recursos naturales que rodean el lugar tomando en cuenta el agua de los canales aledaños.

La ejecución del proyecto consiste en realizar un diseño, para ello se requiere de la realización de estudios preliminares como análisis de agua y caracterización de materiales, después de ello se requiere de la realización de la ingeniería básica, la ingeniería de detalle, procura de equipos y materiales, la construcción, la realización de pruebas, la operación y finalmente con ello la administración del proyecto.

La Figura 3 muestra las actividades requeridas en un programa de ingeniería que muestra las actividades precedentes y el orden requerido considerando fechas de ejecución.

Figura 13. Diagrama de planeación





## **5.2 Diseño del sistema de tratamiento**

### **Selección del tren de tratamiento**

El agua a tratar no contiene altas concentraciones de contaminantes y la calidad que se busca en el efluente es de riego agrícola, por lo tanto el tren de tratamiento propuesto consiste en un tratamiento físico de rejillas de cribado que separe los componentes sólidos suspendidos en el agua y un sistema biológico tipo humedal artificial de flujo horizontal.

El tren de tratamiento elegido es adecuado al tipo de terreno ya que en las zonas chinamperas no se pueden construir grandes estructuras, además de que este tipo de sistemas no altera la arquitectura del paisaje, genera subproductos útiles para el lugar, es de bajo costo y fácil operación.

El sistema se conformará por las rejillas situadas en la alimentación del influente, una tanque de alimentación, el humedal artificial, un segundo tanque de almacenamiento y una bomba que servirá para alimentar al sistema.

### **Ubicación de la zona de tratamiento**

Lugar: San Gregorio Xochimilco D.F. Esta delegación cuenta con un área de 1, 251, 000 m<sup>2</sup>, la precipitación media anual es de 957.015 miles de m<sup>3</sup> al año.

Latitud 19 -16, Longitud 99 – 00, Altitud 2280 MSNM

Clima. En esta delegación el clima se caracteriza por ser templado subhúmedo con lluvias en verano (Gómez de León, 2003)

En la Figura 14 se muestra la ubicación de la zona de San Gregorio Atlapulco de Xochimilco, lugar donde se siembran diferentes cultivos, entre ellos diversos tipos de lechugas.

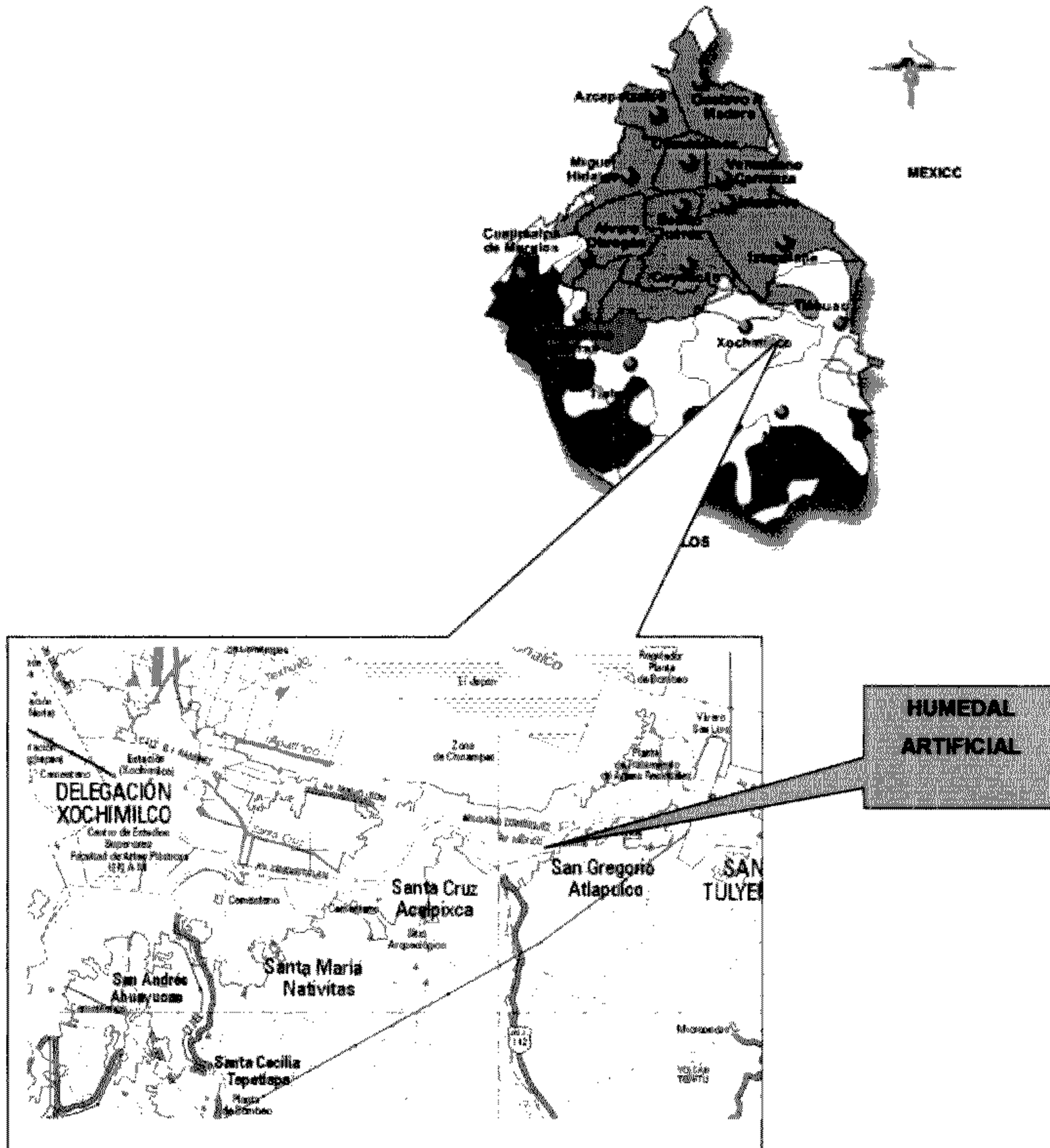


Figura 14. Ubicación del HA en el Distrito Federal

### **5.3 Selección de los componentes del humedal y del sistema experimental**

#### **Sustrato**

El material utilizado fue Tezontle negro, el cual ha comprobado su alta eficiencia en remoción de contaminantes de aguas residuales domésticas en otros humedales construidos con anterioridad como el de los viveros de Coyoacán (Ramírez, 1998). Además es un material que se puede encontrar fácilmente en la Ciudad de México.

#### **Plantas Vasculares**

Las plantas vasculares elegidas fueron carrizos *Arundo donax* debido a su gran disponibilidad y a su adaptabilidad a la zona. Es importante conocer en el desarrollo experimental su resistencia al agua.

#### **Influente de agua**

El agua utilizada en el influente del sistema fue obtenida de los canales de Xochimilco durante época de invierno y primavera, fue recolectada de manera semanal y almacenada a una temperatura de 4°C.

#### **Contenedor**

Para realizar una simulación del sistema se utilizaron recipientes de plástico cumpliendo la función de la geomembrana en un humedal artificial, provistos de una manguera para sustraer el efluente de manera controlada y ser almacenado a bajas temperaturas para ser analizado.

## 5.4 Presupuesto

El tamaño del humedal depende de la cantidad de agua que se tratará, ésta es de 2000 L/d debido a que es el agua que se requiere en la chinampa de San Gregorio Xochimilco. En base a ello se obtuvo la Tabla 18 que nos muestra los costos del equipo.

Tabla 18. Costo de equipo

Equipo	Costo
Bomba (esta puede ser proporcionada por el agricultor)	\$3,250.00
Tanque de alimentación	\$3,100.00
Tanque de almacenamiento	\$3,100.00
Humedal	\$1,646.00
Rejilla	\$800.00
Total	\$11,896.00

Con estos datos se calcula un estimado considerando las características de esta planta de tratamiento y se obtiene la Tabla 19 con la cual se puede conocer la inversión inicial.

Tabla 19. Inversión Inicial

Concepto	Porcentaje del costo de equipo	Costo
Instalación	30%	\$3,568.80
Tubería	15%	\$1,784.40
Instrumentación	5%	\$594.80
Edificios	5%	\$594.80
Servicios auxiliares	1%	\$118.96
Líneas exteriores	2%	\$237.92
<b>Costo físico de la planta</b>		<b>\$18,795.68</b>
Ingeniería	20%	\$3,759.14
Contingencias	10%	\$1,879.57
Factor de tamaño	1%	\$187.96
	<b>Total</b>	<b>\$24,622.34</b>

La tabla 20 nos muestra los costos anuales de mantenimiento del humedal.

Tabla 20. Costo de mantenimiento del humedal

<b>Costos de Operación y mantenimiento</b>	<b>Costo anual</b>
Servicios	\$2,400.00
Limpieza	\$2,300.00
Reparación	\$500.00
Reemplazos menores	\$200.00
Renta anual del terreno	\$3,500.00
<b>Total</b>	<b>\$8,900.00</b>

## 5.5 Ingeniería básica

### Objetivo

Diseñar y construir un humedal artificial de flujo horizontal (HAFH), a nivel planta piloto para tratar aguas de canal que servirán para el riego del cultivo agrícola en las delegaciones de Xochimilco y Tláhuac.

### Capacidad

Con base en los cálculos realizados anteriormente, se establece que el flujo de alimentación al sistema:

Flujo mínimo: 1400 L/d

Flujo de operación: 2000 L/d

Flujo máximo: 2600 L/d

### **Especificaciones de las alimentaciones y del producto**

En la siguiente tabla se muestran las características obtenidas en el laboratorio del agua proveniente de los canales de Xochimilco que servirá de influente al sistema tipo Humedal Artificial, y las características a las cuales se deberá llegar para cumplir con la normatividad vigente NOM-001-SEMARNAT-1996.

Del agua de los canales se obtendrá el influente para el sistema, esto se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21 Características del Influyente y Efluente.

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Influente</b>	<b>Efluente</b>
DQO	mgO <sub>2</sub> /L	320	80
DBO <sub>5</sub>	mgO <sub>2</sub> /L	210	75

### **Eliminación de desechos**

La presencia de materiales sólidos de desecho en la rejilla de protección de la tubería de succión y el exceso de lodos así como la producción de hierbas y tallos provenientes de la poda de los carrizos serán removidos y destinados como composta para su posterior uso en la chinampa.

El humedal artificial no genera lodos, lo cual es importante porque no requiere tratamiento posterior.

## Servicios disponibles y requeridos

### Energía

El área donde se construirá el sistema cuenta con los servicios básicos para el funcionamiento de la planta. La bomba funcionará con gasolina.

### Códigos y especificaciones

Los criterios para la calidad de agua tratada por el HAFH se basa en la norma NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición en el riego agrícola.

#### 5.4.1 Características del lugar

##### Datos metereológicos

Es importante considerar los cambios en el clima y todas las condiciones metereológicas del lugar donde se construirá el humedal para considerar si estos factores afectarán la construcción o la operación del humedal, así como el buen funcionamiento de éste, algunas de estas características las podemos observar en la Tabla 22.

Tabla 22. Datos Metereológicos de la zona de Xochimilco

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Máxima extrema	31°C	Promedio mes más frío	10.76°C
Mínima extrema	-1.2°C	Humedad relativa	10.81°C
Máxima promedio anual	23.8°C	Máxima	26.53°C
Mínima promedio anual	7.5°C	Mínima	1.83°C
Promedio mes más caliente	18.26°C		

## **Datos generales**

El clima de la zona se caracteriza por ser semicálido y subhúmedo. Por otro lado, el suelo es arcilloso con una composición predominante de carbonato de calcio.

Los datos de precipitación son mostrados en la Tabla 23.

Tabla 23 Precipitación

Precipitación Mínima	51.88 mm
Precipitación Máxima	104.89 mm
Precipitación media anual	57.39 mm

### **5.4.2 Bases y criterios de diseño para equipo**

#### **Rejillas de cribado**

La función de la rejilla es proteger la bomba y los demás componentes del sistema de basura y residuos que se puedan encontrar en los canales.

#### **Bomba**

El humedal contará con una bomba para extraer el agua del canal. Este tipo de bombas ya son utilizadas en esta zona con el fin de obtener el agua para riego.

Todas las bombas centrífugas deberán ser dimensionadas y seleccionadas para un caudal 10% mayor al caudal de diseño. El motor eléctrico será del tipo inducción, seleccionado para cubrir todo el rango de operación para el diámetro de impulsor seleccionado.

La bomba esta diseñada para bombear aguas de canal que no contengan partículas en suspensión con diámetro superior a 20 mm.



## **Tanques**

Se utilizará un tanque de alimentación a una altura de 1.5 m y a 1m de distancia para almacenar el agua proveniente del canal y poder alimentar el humedal, a la salida del humedal se utilizará otro tanque con la misma capacidad del primero que servirá para obtener el agua para las hortalizas, la bomba utilizada para alimentar puede usarse también para realizar el riego de la manera en la que los campesinos actualmente lo hacen.

## **Humedal Artificial**

El HAFH es alimentado por medio de una manguera proveniente del primer tanque, después de un tiempo de residencia (TRH) el agua es vertida al segundo tanque en donde es almacenada hasta ser utilizada en el riego.

Como ya se mencionó con anterioridad, existen parámetros de diseño que se utilizarán para la construcción de un Humedal Artificial

## **Profundidad del lecho**

La profundidad depende de las características de la planta seleccionada, para plantas de tipo carrizo se recomienda una profundidad de 0.70 m.

## **Área superficial total**

$$As = \frac{Fv * (\ln Ci - \ln Ce)}{Kt * h * n}$$

$C_i$  = concentración de  $DBO_5$  del influente, (mg / L)

$C_e$  = concentración de  $DBO_5$  de efluente, (mg / L)

$K_t$  = constante de primer orden, dependiente de la temperatura, (1 / día)

$h$  = profundidad del lecho en la sección inicial del sistema, (m)

$n$  = porosidad del lecho, (adiimensional)

$F_v$  = flujo volumétrico, ( $m^3 / d$ )

$A_s$  = área superficial

La porosidad se obtiene por medio de:

De datos experimentales se obtuvo la densidad real y la aparente:

$$n = 100 * \left( 1 - \frac{\text{Densidad Aparente}}{\text{Densidad Real}} \right)$$

$$n = 100 * \left( 1 - \frac{710 \text{ g / L}}{1518.98 \text{ g / L}} \right) = 53.25\%$$

De datos experimentales se obtuvo la concentración inicial, la concentración final de  $DBO_5$  es la que esperamos obtener en base a la NOM-001-SEMARNAT-1996

$$C_i = 210 \text{ mgO}_2 / \text{L}$$

$$C_e = 75 \text{ mgO}_2 / \text{L}$$

y se determinó la conductividad hidráulica:

$$K = 0.09 \text{ cm}^3 / \text{cm}^2 \text{ s}$$

La constante  $K_t$  se calcula de la siguiente manera:

$$K_t = K_{20} * (1.1)^{T-20}$$

De la literatura se obtiene que  $K_{20} = 1.3$

$$K_1 = 1.3 * (1.1)^{25-20} = 2.1$$

El flujo volumétrico que se requiere es de aproximadamente 2000 L/d ( $2\text{m}^3/\text{d}$ ).

$$A_s = \frac{2\text{m}^3 / \text{d} * (\ln 210 - \ln 75)}{2.1 * 0.5 * 0.57} = 3.2\text{m}^2$$

Tomando en cuenta que por cada  $\text{m}^2$  se requieren 2 plantas, se concluye que en total se utilizarán 10 plantas

La relación largo ancho se tomará con una proporción de 2:1, por lo tanto si el área es de  $3.1\text{m}^2$  las medidas deberán ser de  $a = 1.24\text{m}$  y  $l = 2.60\text{m}$

### Tiempo de retención hidráulico

El humedal será de tipo rectangular con descarga al final del sistema, por lo tanto:

$$THR = \frac{l * a * n * h}{f_v}$$

$a = \text{ancho}$

$l = \text{largo}$

$$THR = \frac{1.24\text{m} * 2.60\text{m} * 0.57 * 0.5\text{m}}{2\text{m}^3 / \text{d}} = 0.46 \text{ días (11 horas)}$$

### Balance global de agua

Para efecto de obtener el balance de agua se utiliza la ecuación:

$$\frac{dV}{dt} = (f_{vi} + P) - (f_{ve} + ET + I)$$

$\frac{dV}{dt}$  = volumen de acumulación en el sistema,  $\text{m}^3 / \text{año}$

$f_{vi}$  = flujo volumétrico anual,  $\text{m}^3 / \text{año}$

$P$  = volumen de precipitación anual,  $\text{m}^3 / \text{año}$

$f_{ve}$  = flujo volumétrico anual que sale del sistema,  $\text{m}^3 / \text{año}$

$ET$  = volumen de evapotranspiración,  $\text{m}^3 / \text{año}$

$I$  = volumen de infiltración,  $\text{m}^3 / \text{año}$

$$\frac{dV}{dt} = (730m^3 / \text{año} + 51.85m^3 / L) - (704.45m^3 / \text{año} + 25.55m^3 / \text{año} + 0) = 51.85m^3 / \text{año}$$

En la tabla 24 se muestran los parámetros de diseño obtenidos por medio de los cálculos para realizar la construcción del humedal.

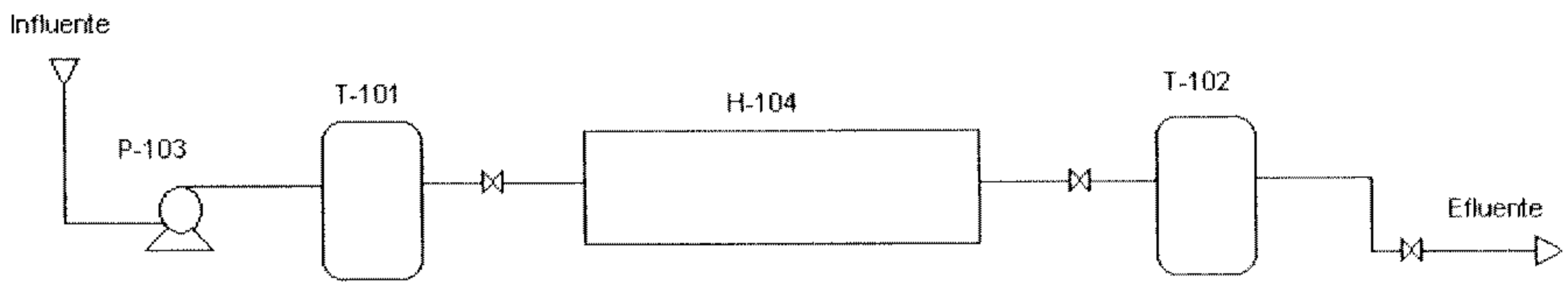
24. Tabla de parámetros de diseño

Área superficial	3.2 m <sup>2</sup>
Largo	2.5 m
Ancho	1.3 m
Capacidad de tratamiento	2 m <sup>3</sup> /d
Profundidad del lecho	0.70 m
Pérdidas por evapotranspiración	0.071 m <sup>3</sup> /año
Acumulaciones por lluvia	0.142 m <sup>3</sup> /año
Capacidad de tratamiento anual	730 m <sup>3</sup> /año
TRH	0.46 días (11 horas)

#### 5.4.3 Filosofía básica de operación

El humedal opera como un reactor tipo Batch, es alimentado de 2m<sup>3</sup> de agua por medio de una línea conectada al tanque de alimentación, el tiempo de residencia hidráulico es de 11 horas y posteriormente el agua es extraída y depositada en un tanque en el cual se almacena para ser utilizada posteriormente.

La operación del humedal es de modo manual, pudiéndose manipular la bomba también para el riego. La Figura 14 es el diagrama de flujo del sistema de tratamiento que se empleará considerando cada elemento de éste.



Lista de equipo	
P-103	Bomba
T-101	Tanque de alimentación
H-104	Humedal
T-102	Tanque de Imacenamiento

Figura 14. Diagrama de Flujo

En la Figura 15 se muestra el plano del humedal en el que se observan las medidas del humedal. En la figura 16 podemos ver la vista frontal del humedal así como la profundidad de éste.

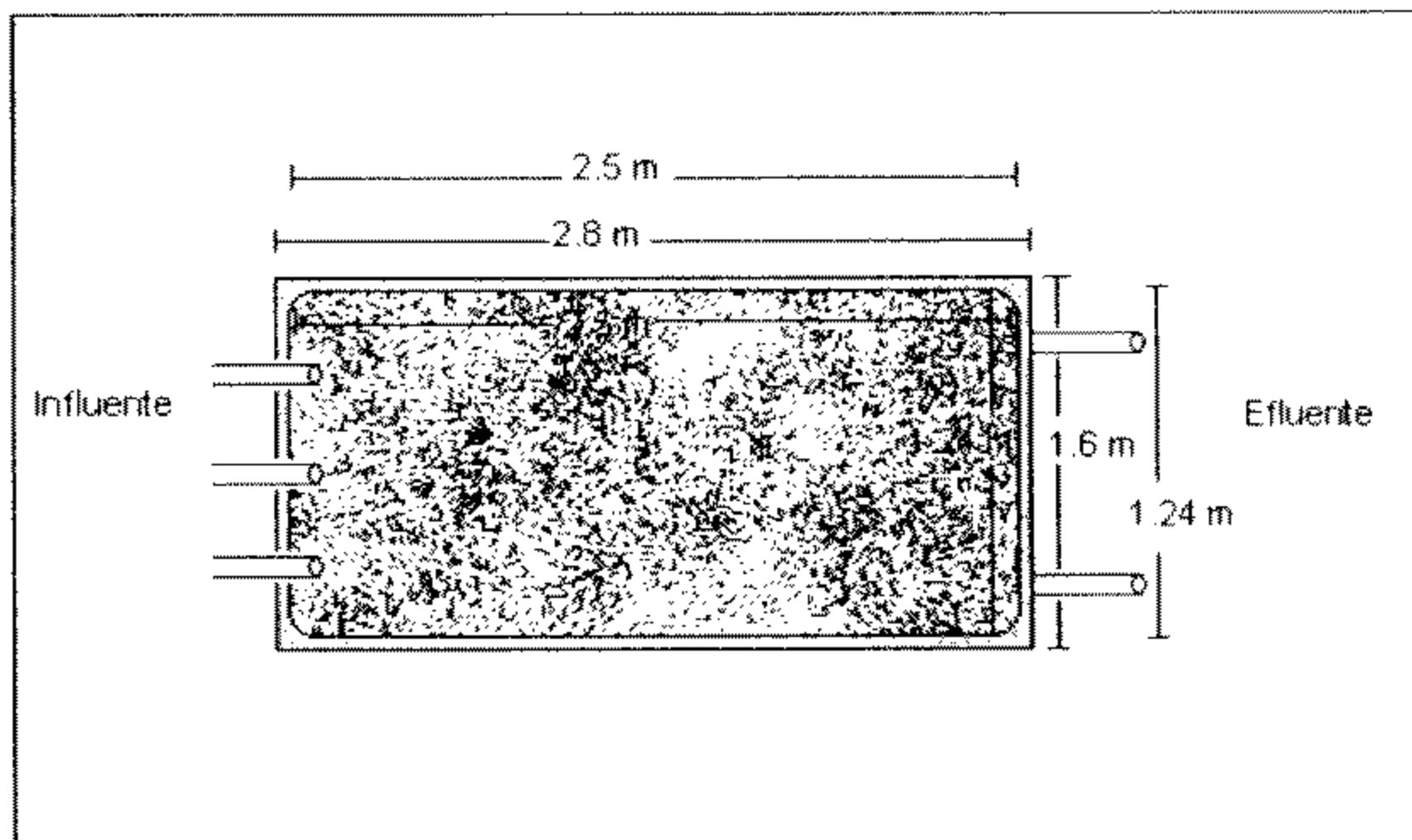


Figura 15. Plano del humedal

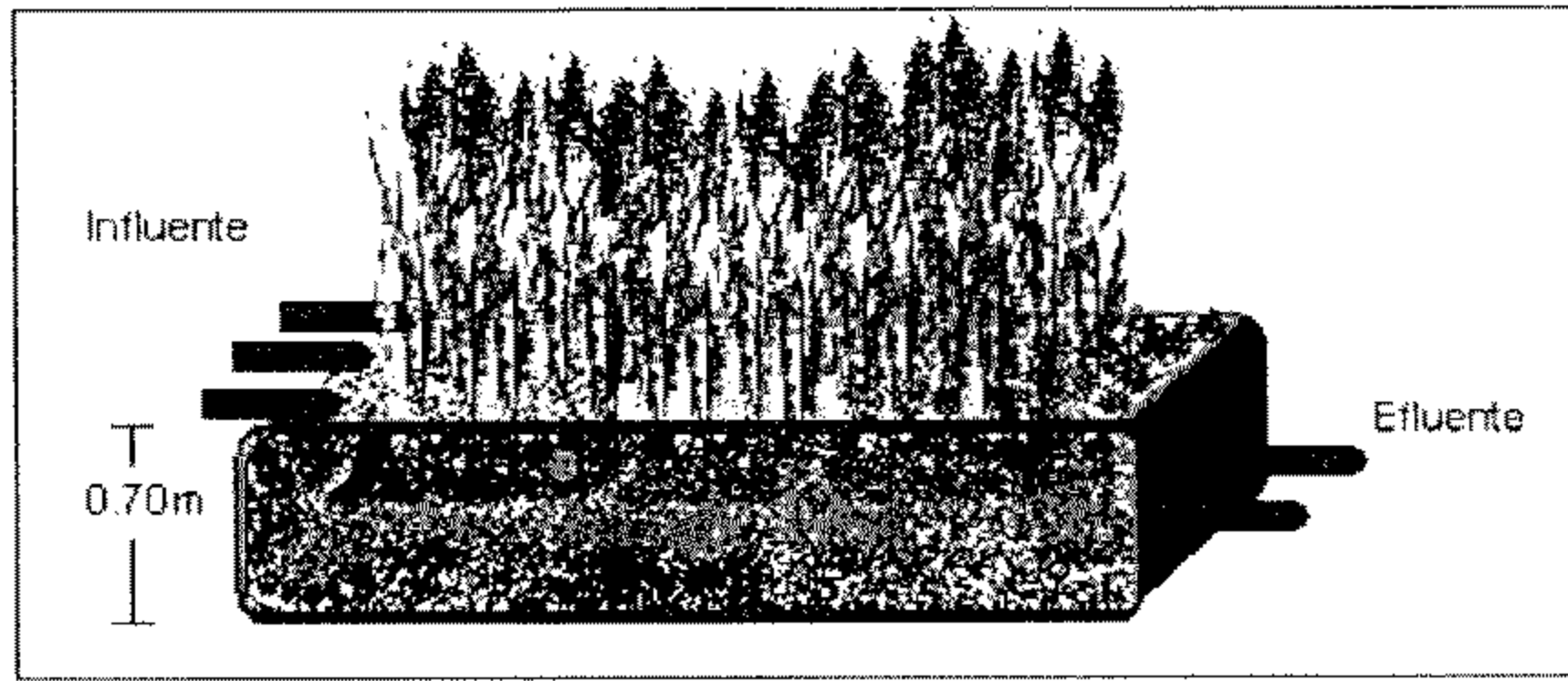


Figura 16. Vista frontal del humedal

El proceso consta de una parte física en la que se remueven sólidos y otra donde se llevan a cabo diversos fenómenos depurativos, entre los que destacan la filtración, sedimentación, adsorción y degradación microbológica. El sistema operará con un rendimiento de 80% a 95%, en términos de la remoción de materia orgánica, medida como  $DBO_5$ , la cual es el principal contaminante que contienen las aguas provenientes de los canales.

La concentración de  $DBO_5$  y DQO a la entrada del humedal será de aproximadamente  $320 \text{ mgO}_2/\text{L}$  de DQO y  $210 \text{ mgO}_2/\text{L}$  de  $DBO_5$ . esperando llegar a concentraciones de 80 y  $75 \text{ mgO}_2/\text{L}$  respectivamente.

La superficie del humedal será de  $3.2 \text{ m}^2$ , con una profundidad de 0.7 m. Las pérdidas por evapotranspiración se estiman en  $0.071 \text{ m}^3/\text{año}$ . Con acumulaciones por lluvia de  $0.142 \text{ m}^3/\text{año}$ . La capacidad de tratamiento anual del humedal será de  $730 \text{ m}^3/\text{año}$ .

## 6. EVALUACIÓN TÉCNICA

### 6.1 Procedimiento

A continuación se muestra el esquema de trabajo (figura 17) que se siguió para llevar a cabo la evaluación técnica por medio de ensayos experimentales

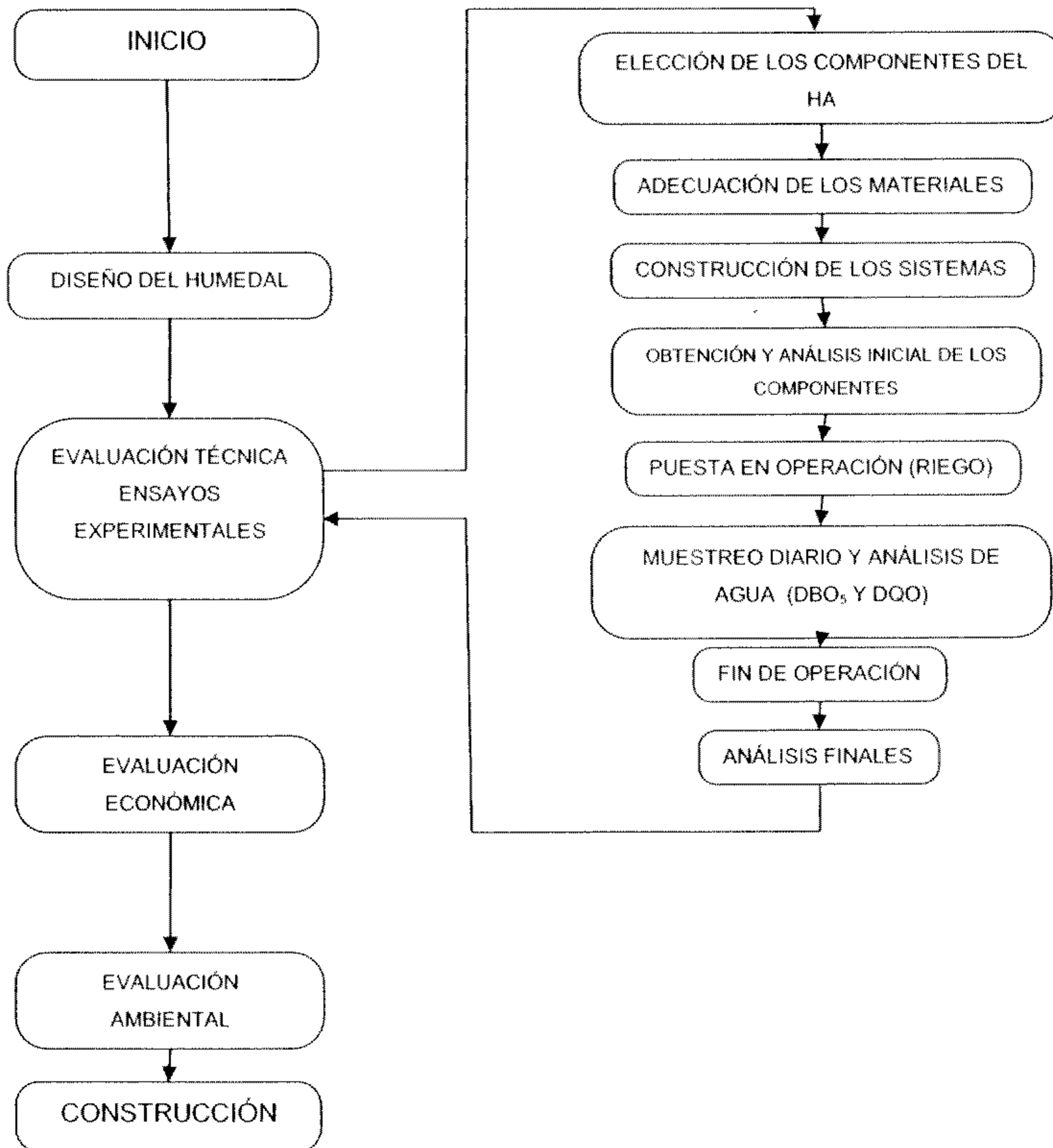


Figura 17. Esquema de trabajo

## 6.2 Ensayos experimentales

### Caracterización del material de sustrato

El tezontle (Figura 18) es una roca volcánica con un alto contenido de hierro y magnesio así como O y Si (Cornelius, 1997).

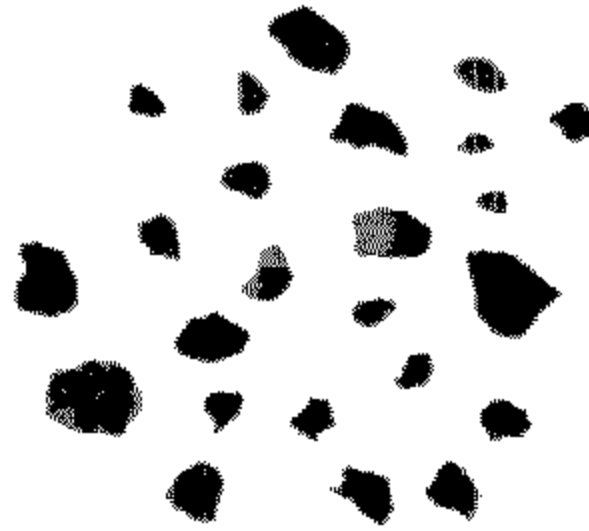


Figura 18. Apariencia del material de sustrato utilizado

Porosidad: 53 %

Estructura: Vacuolar (huecos producidos por la desgasificación) (Cailleaux, 1978).

Coloración: Grisácea

Conductividad Hidráulica:  $0.09 \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \text{ s}$

### Caracterización química del agua

Para la realización de ésta se considerará DQO y DBO5 debido a que son parámetros para medir la cantidad de materia orgánica en el agua (Rodier, 1990). Los resultados de la caracterización inicial de agua mostraron que la concentración de DBO<sub>5</sub> se encontraba entre 190-210 mgO<sub>2</sub>/L y la de DQO entre 310-320 mgO<sub>2</sub>/L.

## 6.3 Obtención de la eficiencia de remoción de materia orgánica y evaluación de la resistencia de la planta al agua

### 6.3.1 Descripción del experimento



Los ensayos experimentales consistieron en la caracterización de componentes como el agua y sustrato considerando tamaño, porosidad, conductividad hidráulica y la construcción de tres sistemas que simularon el funcionamiento de un humedal artificial con el objetivo de obtener los porcentajes de remoción que se obtendrían con el HA, sistemas A (original), B (réplica) y C (sin planta), corroborar la resistencia de las plantas vasculares propuestas, conocer el balance de agua obteniendo pérdidas por evapotranspiración y obtener la biodegradabilidad del agua por medio de parámetros como DBO<sub>5</sub> y DQO.

Estos sistemas fueron alimentados de manera discreta a razón de 3L/d de agua proveniente de los canales considerando que un humedal puede tratar aproximadamente 3m<sup>3</sup>/d en un área de 75 m<sup>2</sup> y tomando en cuenta las dimensiones de los contenedores. De igual manera se sustrajo diariamente el agua contenida para obtener su volumen y ser analizada obteniendo porcentajes de remoción de DBO<sub>5</sub> (demanda biológica de oxígeno) y DQO. (demanda química de oxígeno). Estos indican la remoción de materia orgánica y a pesar de que la DQO no se encuentra en la norma es importante ya que representa la oxidación química y permite junto con la DBO<sub>5</sub> una estimación rápida de la biodegradabilidad (Ronzan y Dapena, 1995).

Los sistemas se mantuvieron en un invernadero para tener control sobre factores como el viento, lluvia, temperatura y humedad. La temperatura fue de 25°C y la humedad relativa de 42%. Una vez que fueron montados los sistemas y que los carrizos mostraron un crecimiento de 2 cm se comenzó con el riego controlado.

En la Figura 19 se muestra el esquema de los experimentos A y B.

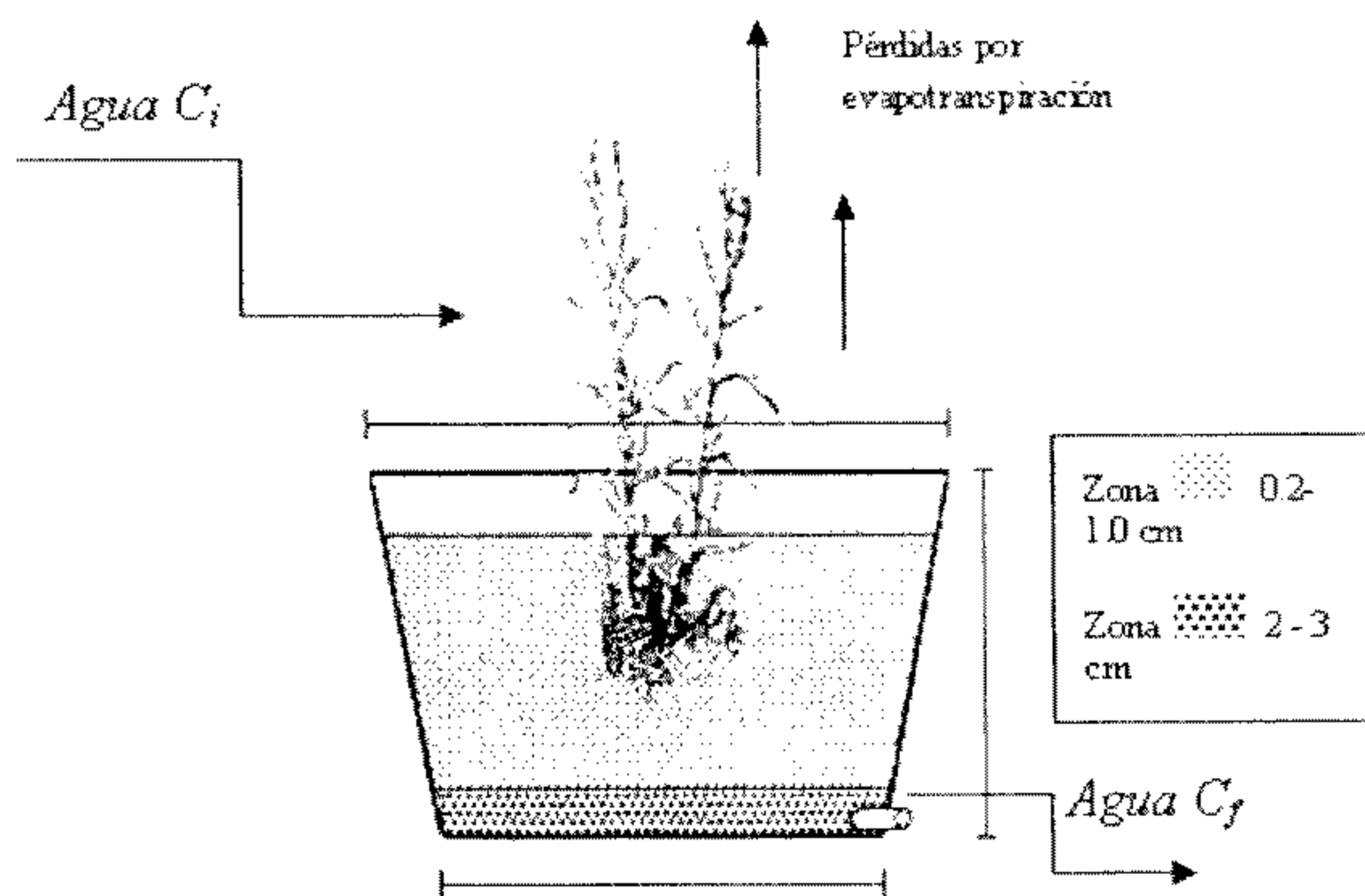


Figura 19. Diagrama de los sistemas

### 6.3.2 Materiales y métodos

Para obtener el diámetro deseado se utilizó un molino de rocas situado en el laboratorio de ingeniería química de la Facultad, de Química de la UNAM y finalmente un proceso de tamizado para obtener diámetros uniformes. Los tamaños de las partículas del tezontle se dividieron en 3 categorías mostradas en la tabla 25.

Tabla 25. Distribución de los tamaños de partículas del material de soporte

Categoría	Diámetro (mm)	% en cantidad	% en peso
1	$3.36 < D < 5$	1.5	11.8
2	$2.5 < D < 3.36$	14.3	35.6
3	$1 < D < 2.5$	84.2	53.45

Al inicio del experimento los carrizos comenzaban a crecer, por lo tanto la altura de estos se consideró cero, el peso fue el del tallo inicial.

Las técnicas que se utilizaron para medir el contenido de materia orgánica carbonosa en el agua fueron DQO y DBO<sub>5</sub> (Chapman y Pratt, 1973) de acuerdo

con los métodos estandarizados a nivel nacional e internacional (APHA, 1998) y en base a las normas, Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001. Las técnicas realizadas se encuentran en la sección de anexos B y C.

### 6.3.3 Resultados de la primera etapa

Se realizaron 18 mediciones iniciando el día 8 de noviembre y finalizando el 2 de diciembre de 2004. En 6 lecturas el tiempo de residencia no fue de 24 horas debido a que los sábados y domingos no se realizó riego y tampoco se llevaron a cabo mediciones ni toma de muestras.

#### Resultados de los carrizos en la primera etapa

Para poder dar seguimiento al desarrollo de la planta se realizaron mediciones en cuanto al tamaño de las plantas tomando en cuenta, diámetro, tamaño de hojas y altura, además del peso inicial y final de cada planta (Reyes y Tovilla, 2002) mostrados en la tabla 26 y 27.

Tabla 26. Descripción del carrizo del Sistema A

<b>Peso Inicial:</b>	<b>Peso Final</b>	<b>Número de Tallos</b>
22.77g	39.23g	5
<b>Diámetro (cm)</b>	<b>Número de Hojas</b>	<b>Altura (cm)</b>
0.6	5	28.2
0.2	2	5.5
0.25	4	8.5
0.3	3	6.2
0.3	5	14.1

Tabla 27. Descripción del carrizo del Sistema B.

<b>Peso Inicial:</b>	<b>Peso Final</b>	<b>Número de Tallos</b>
21.91g	35.45g	3
<b>Diámetro (cm)</b>	<b>Número de Hojas</b>	<b>Altura (cm)</b>
0.4	4	13.1
0.4	5	31.2
0.2	3	3

Al inicio de la 1ª etapa se sembraron los codos de los carrizos por lo cual no se registró altura ni peso (Tablas 26 y 27).

En las figuras 20, 21 y 22 se puede ver la apariencia de los carrizos al final de la 1ª etapa.



Figura 20. Sistemas al final del experimento.

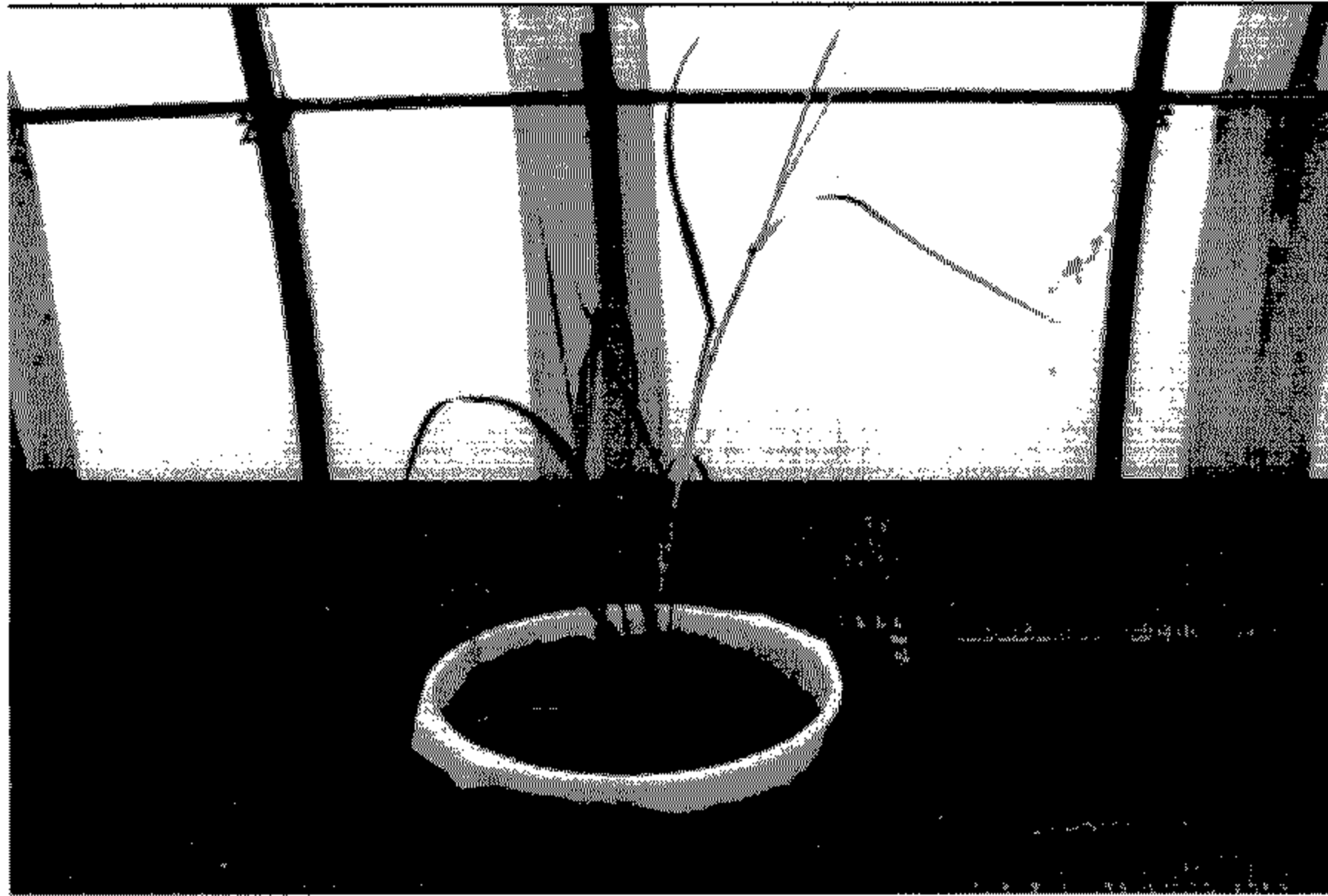


Figura 21. Sistema "A" al final del experimento



Figura 22. Sistema "B" al final del experimento

Las raíces mostradas en las figuras 23 y 24 de ambos carrizos tuvieron un crecimiento de aproximadamente 10 cm.



Figura 23. Raíz del sistema "A"

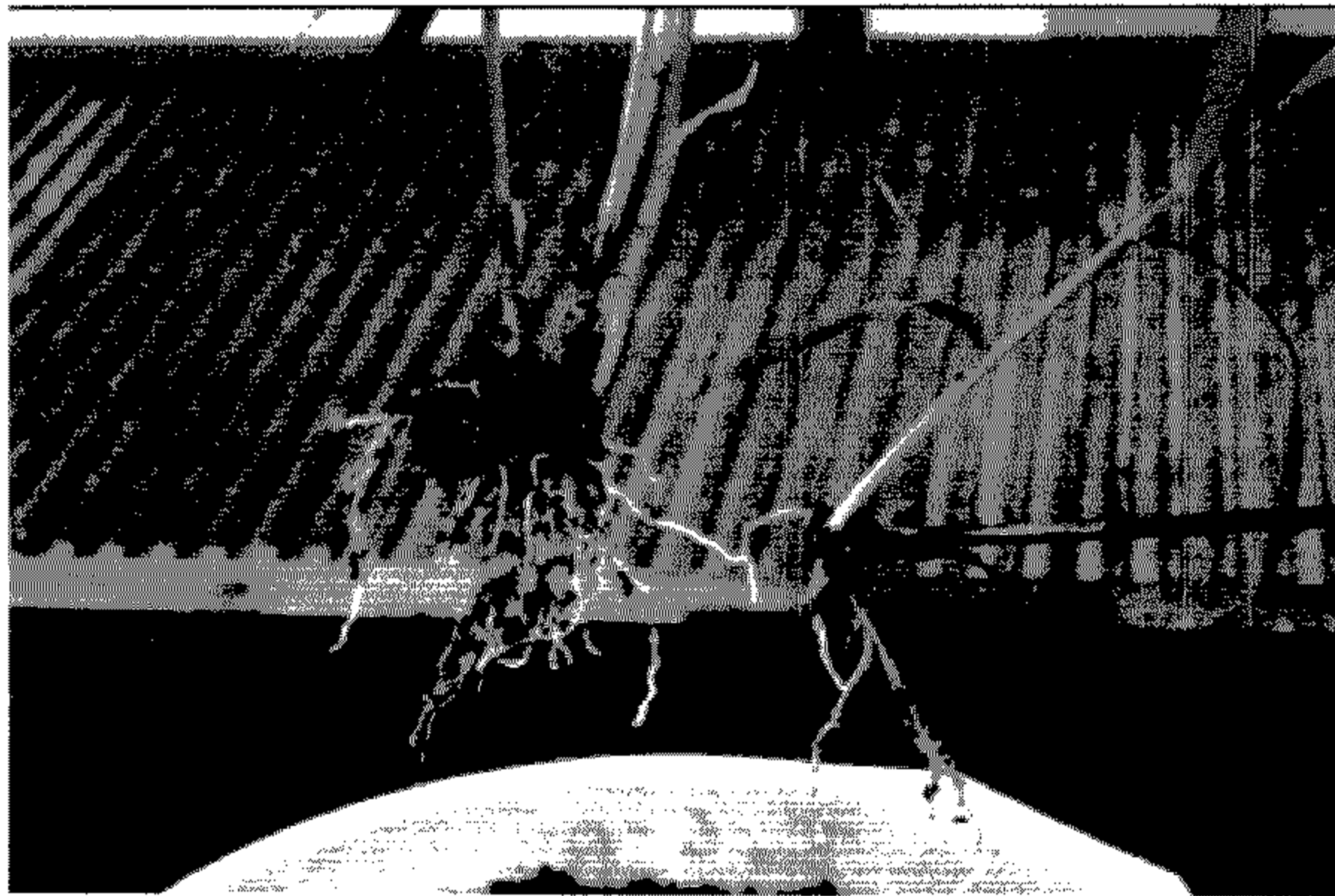


Figura 24. Raíz del sistema B

### **Remoción de $DBO_5$ , DQO y pérdidas de agua en la 1ª etapa**

Las letras corresponden a cada uno de los sistemas A y B con carrizo y C, cada prueba se realizó por duplicado y se realizaron diluciones de 2ml en 100ml.

En la tabla 28 y 29 se muestra los resultados de remoción de DQO y DBO5 respectivamente de los sistemas A, B y C.

Tabla 28. Resultados de DQO

Sistema	DQO mgO <sub>2</sub> /L	% de Remoción
A	168.6	40.33
B	148.9	45.02
C	185.5	36.80

Tabla 29. Resultados de DBO<sub>5</sub>

Sistema	DBO <sub>5</sub> mgO <sub>2</sub> /L	% de Remoción
A	43.5	73.1
B	36.47	76.3
C	45.29	71.0

En la tabla 30 se muestran los resultados en cuanto a pérdidas de agua.

Tabla 30. Resultados de pérdidas de agua

Sistema	Cantidad de agua perdida mL	% de pérdidas de agua
A	120	4.01
B	126	4.19
C	112	3.7

En la figura 25 se puede observar la remoción de DQO de los tres sistemas.

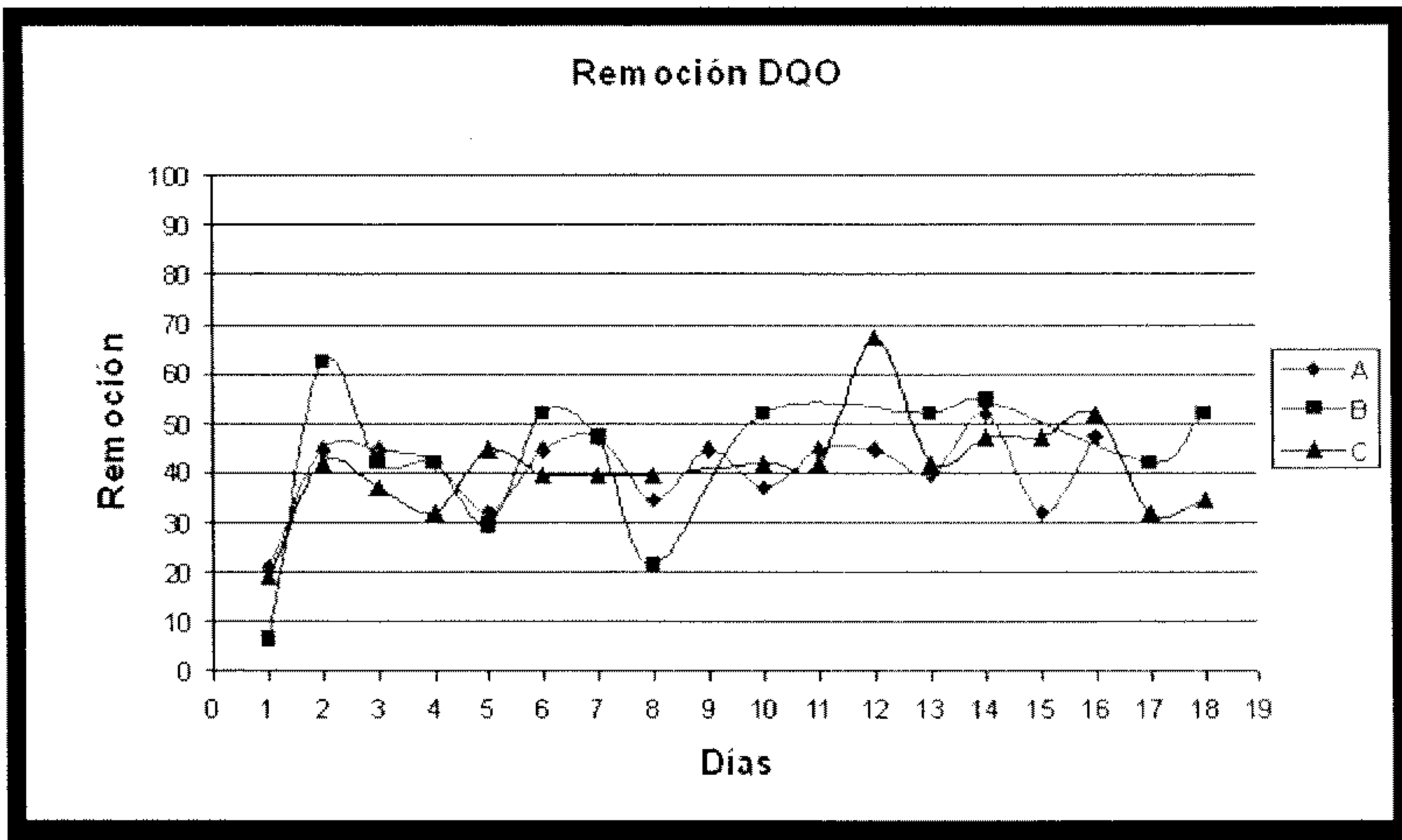


Figura 25. Remoción de DQO en los tres sistemas

En la figura 26 se observa la remoción de  $DBO_5$  a lo largo de los 18 días.

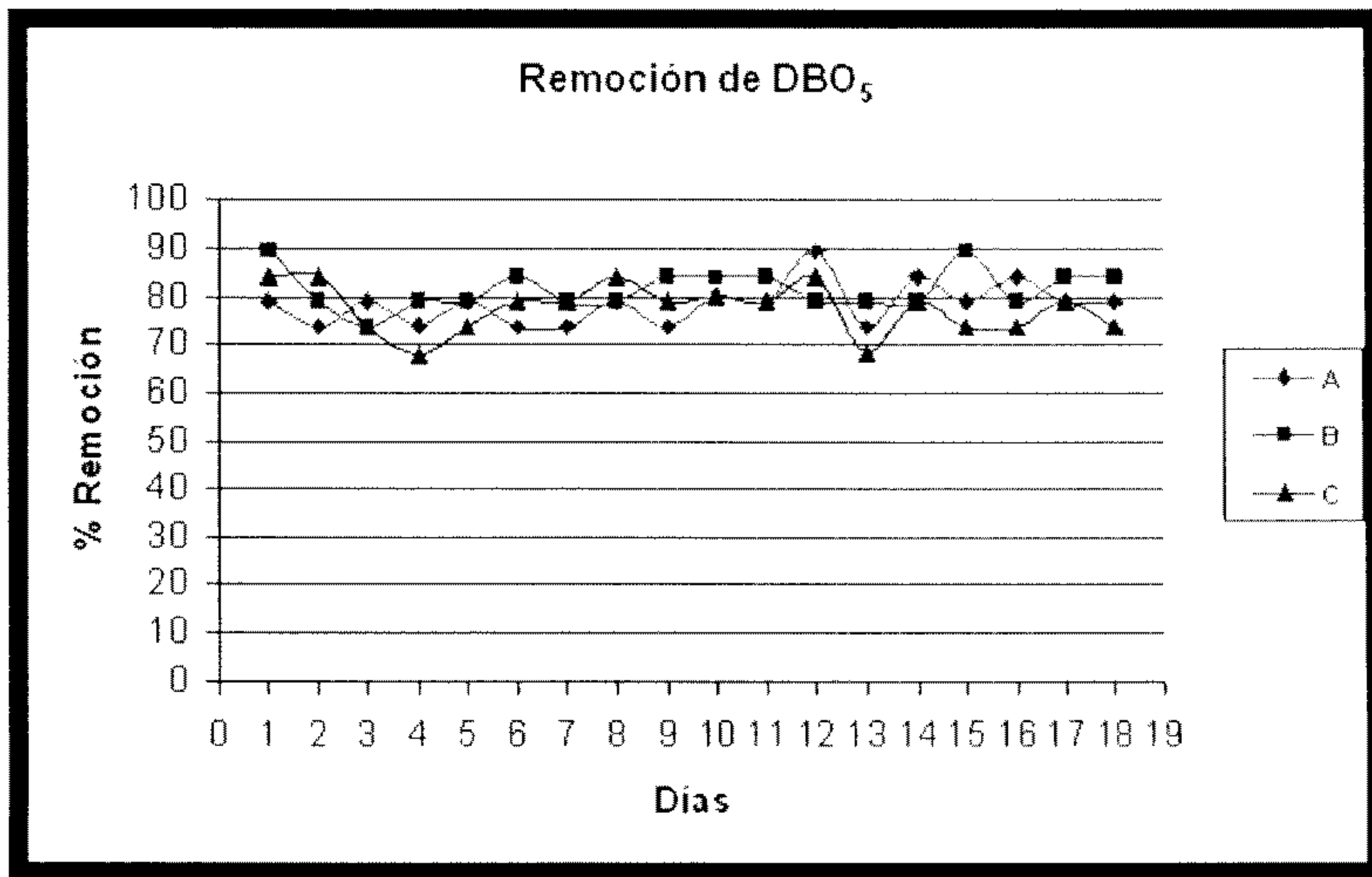


Figura 26. Remoción de  $DBO_5$  en los tres sistemas



#### 6.3.4 Resultados de la segunda etapa

La segunda etapa es similar a la primera, la diferencia es que se realizó en otra época del año (primavera-verano) y los carrizos presentaban mayor crecimiento al inicio. La fecha de inicio de las mediciones fue el 4 de mayo y la fecha final fue el 8 de julio, realizándose un total de 23 mediciones.

#### Resultados de los carrizos en la segunda etapa

En las Tablas 31 y 32 se presentan las características de los carrizos al final de la experimentación de la segunda etapa.

Tabla 31. Descripción del carrizo del Sistema A

Peso Inicial	Peso Final	Número de Tallos	
39.23g	345g	8	
Tallo	Diámetro (cm)	Número de Hojas	Altura (cm)
1	0.7	9	103
2	0.2	13	63
3	0.8	16	165
4	0.5	16	147
5	0.4	18	129
6	0.5	20	154
7	0.4	15	91
8	0.2	8	45

Tabla 32. Descripción del carrizo del Sistema B.

Peso Inicial	Peso Final	Número de Tallos	
35.45g	340g	10	
Tallo	Diámetro (cm)	Número de Hojas	Altura (cm)
1	0.2	3	21.5
2	0.4	14	114
3	0.6	19	151
4	0.4	4	48
5	0.3	14	109
6	0.6	22	137
7	0.7	13	123
8	0.4	3	30
9	0.3	5	53
10	0.4	16	126

Las raíces presentaron un crecimiento de aproximadamente 35 cm (Figuras 29 y 30)

En las Figuras 27 y 28 se muestran los carrizos al final de la experimentación.



Figuras 27 y 28. Carrizo al final de la segunda etapa.



Figuras 29 y 30. Raíces del sistema A y B respectivamente

### Remoción de DBO<sub>5</sub>, DQO y pérdidas de agua

En las Tablas 33, 34 y 35 se muestran las remociones de DQO y DBO<sub>5</sub>, así como las pérdidas de agua de los tres sistemas experimentales.

Tabla 33. Resultados de DQO

Sistema	DQO mgO <sub>2</sub> /L	% de Remoción
A	124	61
B	122	62
C	130	60

Tabla 34. Resultados de DBO<sub>5</sub>

Sistema	DBO <sub>5</sub> mgO <sub>2</sub> /L	% de Remoción
A	59	72
B	63	70
C	58	72

Tabla 35. Resultados de pérdidas de agua

Sistema	Cantidad de agua perdida mL	% de pérdidas de agua
A	250	8.2
B	260	8.6
C	220	7.3

El las Figuras 31 y 32 se pueden observar los porcentajes de remoción de cada uno de los sistemas.

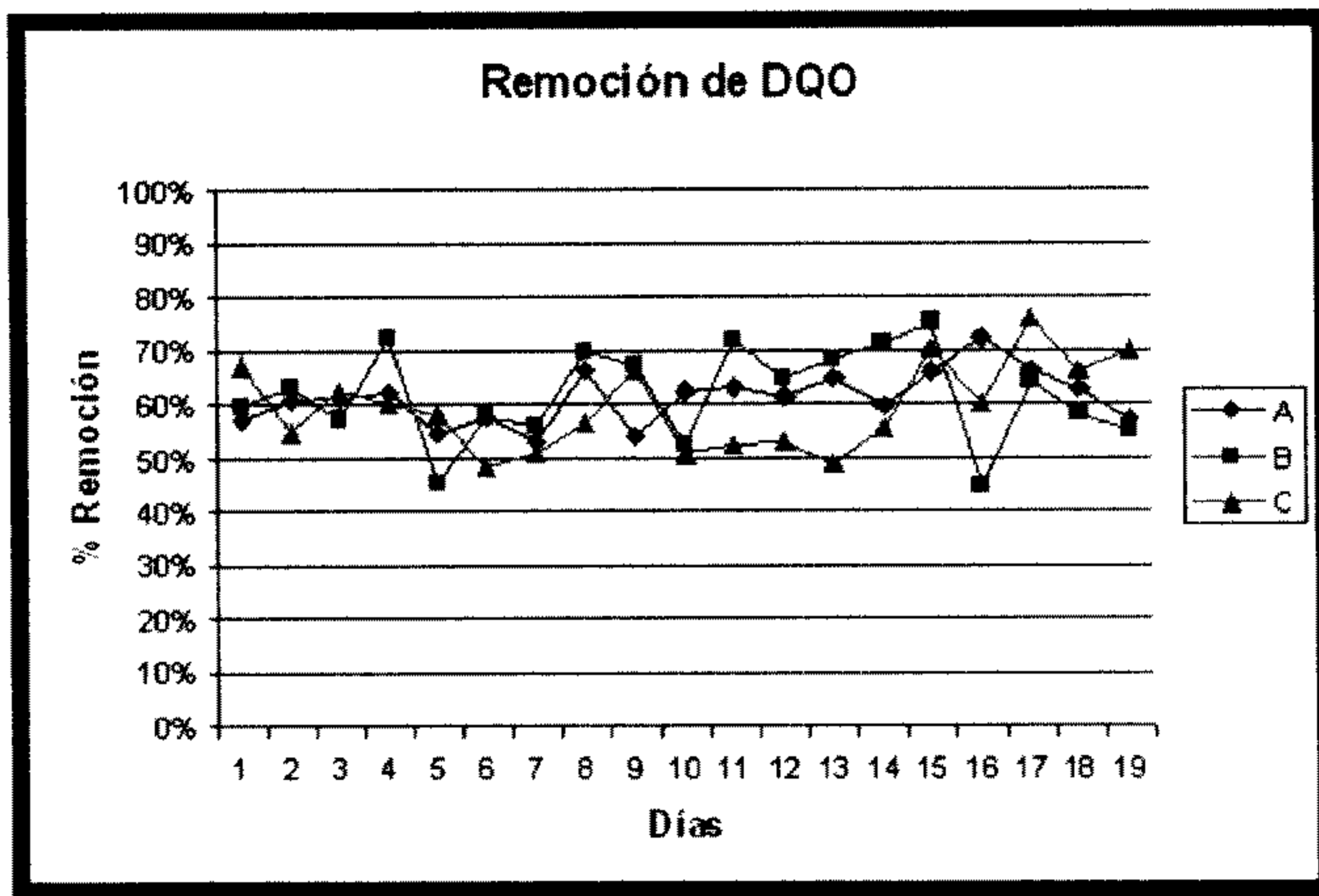


Figura 31. Remoción de DQO en los tres sistemas

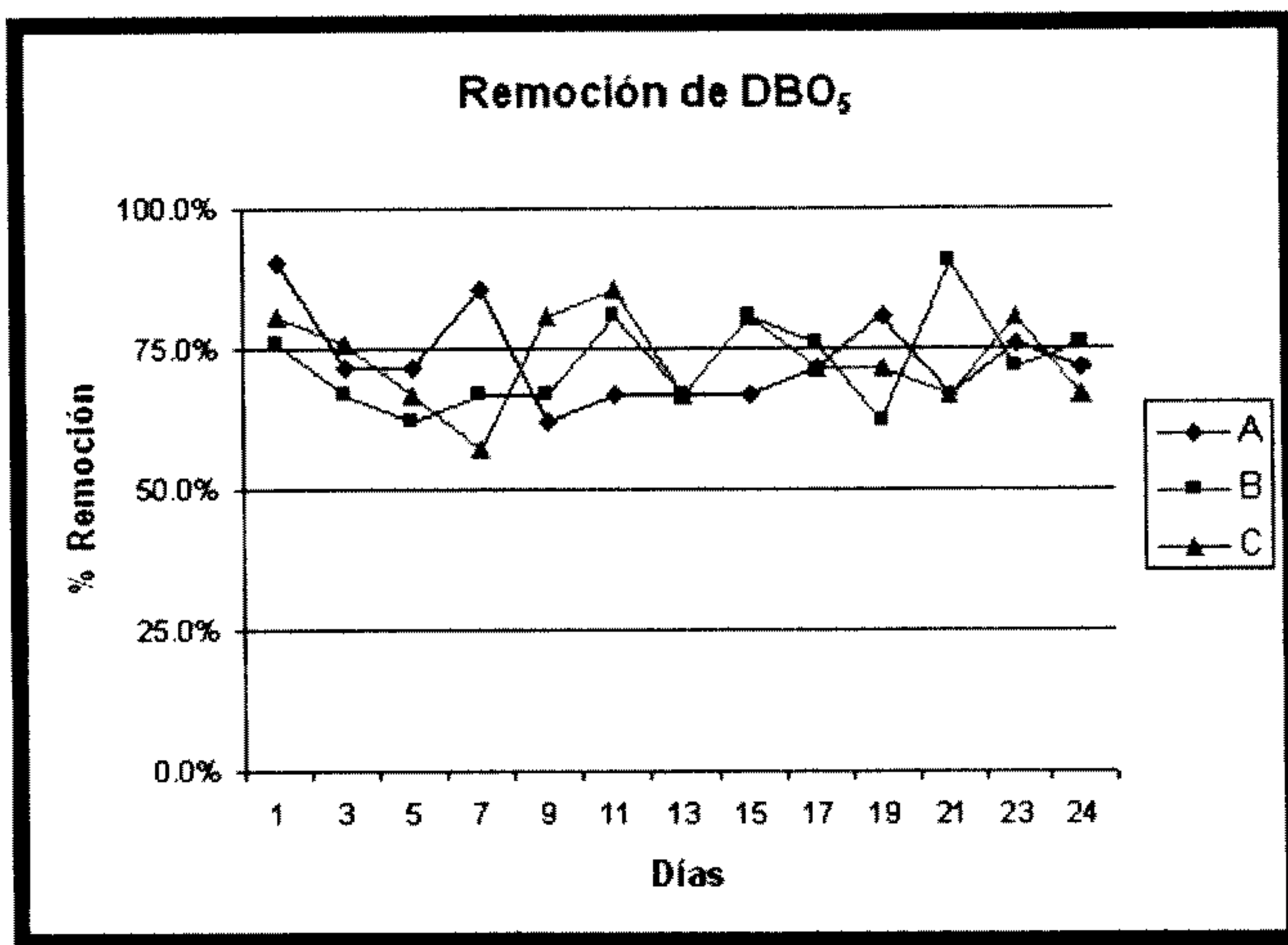


Figura 32. Remoción de DBO<sub>5</sub> en los tres sistemas

## 7. EVALUACIÓN ECONÓMICA

### 7.1 Estrategias de abastecimiento de agua.

Para efectuar la evaluación del proyecto, se comparó el desempeño de dos estrategias de abastecimiento de agua de (2 m<sup>3</sup>/d). La primera tomando en cuenta el Humedal artificial y la segunda las pipas de agua. Se calculó el desempeño, es decir el valor presente neto (VPN) del costo de cada estrategia y después el margen de ahorro que se obtendría seleccionando el humedal artificial.

#### **Abastecimiento de agua mediante el Humedal Artificial.**

El sistema proporcionará agua de calidad a los agricultores, estos no tendrán que comprar pipas de agua tratada como sucede en algunos casos, ni tendrán que utilizar agua directamente de los canales exponiendo la calidad de los productos y la salud de los consumidores

Para llevar a cabo la evaluación de un presupuesto se consideró el tamaño del humedal y la cantidad de agua a tratar. En base a ello se obtuvo lo siguiente (Tabla 36):

Tabla 36. Inversión inicial

	<b>Costo</b>
Costo de Equipo	\$11,896.00
Costo físico de la planta	\$18,795.68
<b>Total</b>	<b>\$24,622.34</b>

El humedal artificial cuenta con un tiempo de vida útil de 20 años. Por ello este costo de inversión inicial se mantiene durante este periodo de tiempo. Durante el periodo de operación del humedal se requiere una cantidad de

\$8,900.00 anuales para su operación y mantenimiento, tomando en cuenta la renta del terreno.

## Abastecimiento de agua mediante pipas.

Cuando los agricultores carecen de agua solicitan pipas a la planta de tratamiento para realizar los riegos, esto les genera un alto costo y les impide controlar de manera adecuada los tiempos de los riegos como se muestra en la Tabla 37.

Tabla. 37 Costos de suministro

Abastecimiento con pipas	
Concepto	Pesos
Litros de agua diarios	2000
Costo por litro	0.024
Costo Diario	48
<b>*Costo anual</b>	<b>13824</b>
Días de Riego/Días	0.8

\*Nota: sólo se tomaron en cuenta los días que se requiere riego.

## 7.2 Evaluación del proyecto

Con base en las cadenas de flujos de efectivo de cada uno de los proyectos se calcularon los valores presentes netos de las estrategias. Para este efecto se utilizó como tasa de referencia CETES (9%) y se tomaron cinco años como horizonte de valuación. También se muestran los resultados para 20 años con el objeto de evaluar el sistema durante su tiempo de vida útil.

Para calcular la tasa interna de retorno (TIR) se resuelve la siguiente ecuación para la tasa.

$$TIR = -C_0 + \frac{C_1}{1+r} + \frac{C_2}{(1+r)^2} + \frac{C_3}{(1+r)^3} + \dots + \frac{C_n}{(1+r)^n} = 0$$



Donde las Ci's son iguales al costo con pipas menos el costo con el humedal. Es decir los flujos del ahorro. La tasa que satisface la ecuación es la TIR. Obteniéndose los valores de VPN mostrados en la Tabla 38.

Tabla 38. Valor presente neto

VPN (20 años de frontera)		VPN (5 años de frontera)	
<b>Humedal</b>	\$105,866.40	<b>Humedal</b>	\$59,240.24
<b>Pipas</b>	\$140,017.02	<b>Pipas</b>	\$67,594.54
<b>Margen de Ahorro</b>	\$34,150.62	<b>Margen de Ahorro</b>	\$8,354.30
<b>TIR</b>	46%	<b>TIR</b>	36%

El margen de ahorro por seleccionar al Humedal se obtuvo tomando la diferencia del costo de la estrategia de pipas menos el costo de la estrategia del Humedal. También se presenta la tasa interna de retorno para los dos horizontes de valuación (Rosen, 2005).

Para mostrar más claramente el comportamiento del proyecto (con 5 años de horizonte), se muestra el VPN del Margen de Ahorro como función de la tasa de interés (Figura 33).

VPN del Margen de Ahorro (5 años)

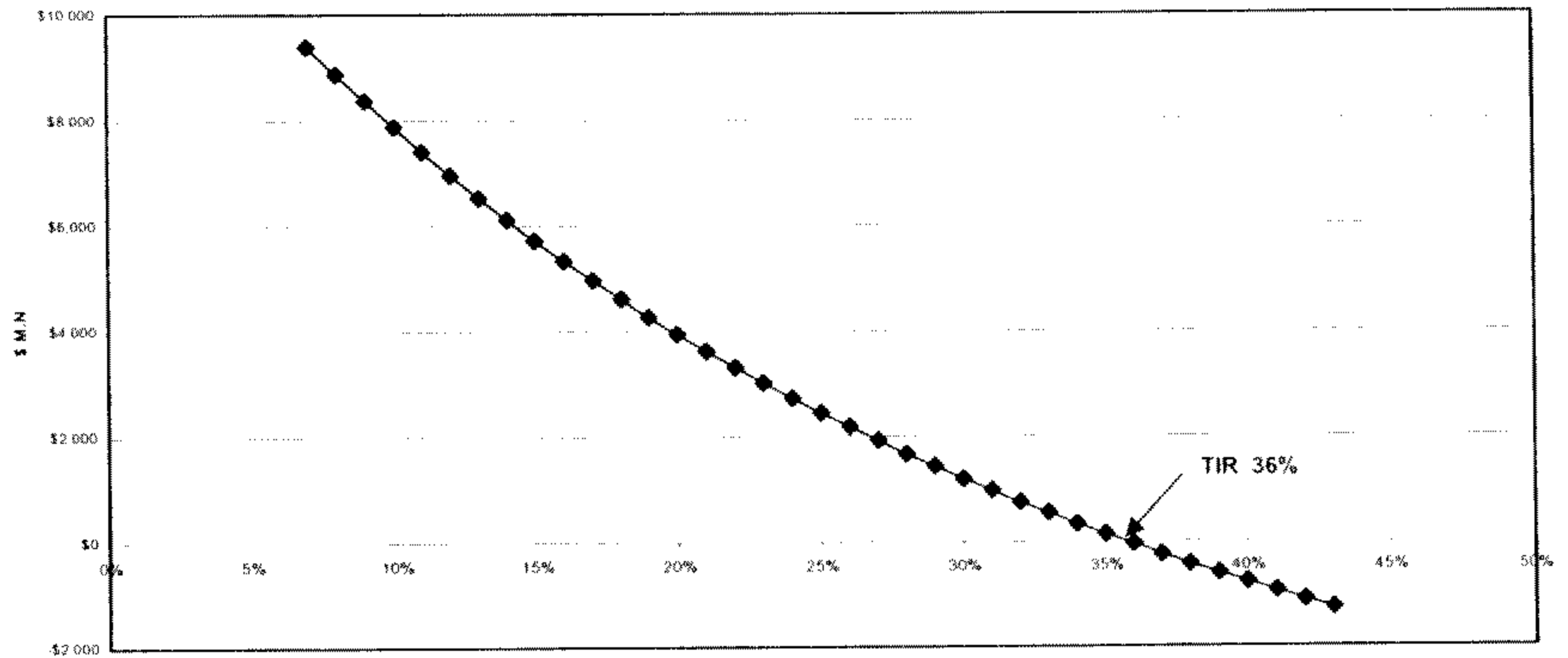


Figura 33. Tasa vs VPN

### 7.3 Desempeño acumulado

Para analizar el proyecto desde la perspectiva del inversionista se presenta el análisis del desempeño acumulado y por tanto del tiempo necesario para recuperar la inversión. Esto justifica la inversión en el HA (Tabla 39).

Tabla 39. Desempeño acumulado. Los flujos de efectivo están valuados en el año cero., del mismo modo el desempeño acumulado.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Flujos de efectivo	-\$10,798	\$4,517	\$4,144	\$3,802	\$3,488	\$3,200	\$2,936	\$2,694	\$2,471
Desempeño acumulado	-\$10,798	-\$6,281	-\$2,136	\$1,666	\$5,154	\$8,354	\$11,290	\$13,984	\$16,455

Este comportamiento se observa más claramente en la Figura 34.

### Valor Presente Acumulado

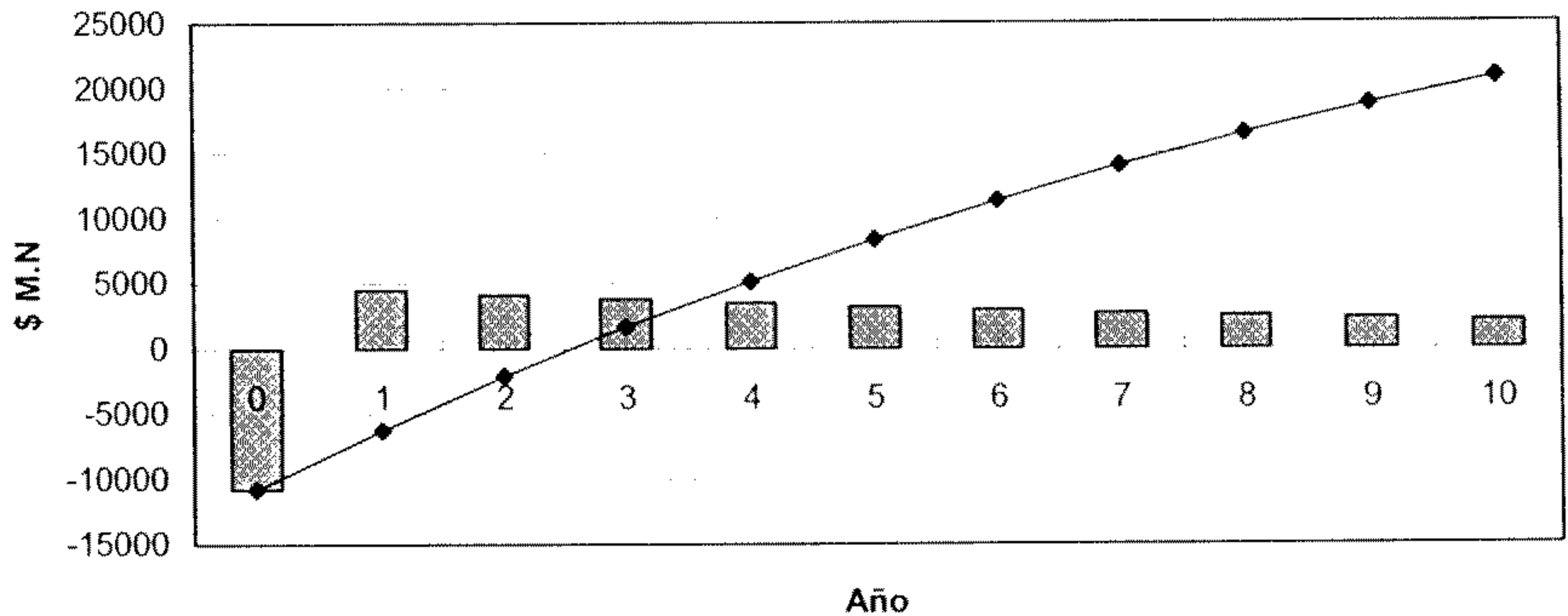


Figura 34. Valor presente acumulado del margen de ahorro

Las barras representan la entrada de los flujos de efectivo. La línea es el valor acumulado de la inversión (es decir el margen de ahorro). La Figura 34 muestra el comportamiento hasta el año diez.

Es difícil predecir el costo de agua en un futuro de 10 años, pero es probable que este aumente. Si ese fuera el caso, el valor del humedal sería todavía mayor.

Dado que en el D.F. más del 95% del cultivo depende de las lluvias. El hecho de obtener agua en cualquier época del año mejoraría no sólo la calidad de los productos sino también la cantidad, obteniendo un mayor beneficio de dichos productos.

Algunos sistemas de tratamiento resultan más baratos que el humedal artificial, incluso se ha pensado en la implementación de estos en la zona de Xochimilco, entre estos se encuentran los filtros de arena. No obstante, estos sistemas requieren mayores gastos de operación, debido a que necesitan mayor

potencia. Los precios de dichos van desde 2300 hasta 90000 pesos, mientras que el costo del humedal artificial se encuentra alrededor de 59000 pesos ([www.aguamark.com](http://www.aguamark.com)).

## 8. EVALUACIÓN AMBIENTAL

El sistema de tratamiento propuesto tiene como objetivo depurar el agua de los canales para su uso en riego agrícola y cumple con la NOM-001-SEMARNAT-1996 cuando el agua obtenida no se utilice con este fin puede ser devuelta a los canales ayudando a eliminar contaminantes de los mismos, lográndose con esto un beneficio no solo a los agricultores sino a la comunidad en general al disminuir contaminantes de los canales.

No existe generación de lodos, lo cual nos ayuda al cumplimiento de la NOM-004-SEMARNAT-2002.

El tiempo de vida útil del humedal es de 20 años, las plantas que sean removidas del humedal pueden ser utilizadas como fertilizante de las hortalizas.

La generación de olores es mínima debido a que el flujo del humedal se realiza a por medio del sustrato, por lo tanto tampoco existe proliferación de insectos como moscas y mosquitos.

El humedal no altera la arquitectura del paisaje, logrando armonizar con el entorno de las chinampas. Los humedales pueden ser adaptados como jardines, e incluso se pueden utilizar para la producción de flores y plantas de ornato.

Los elementos del sistema que rompen con el entorno son los tanques de almacenamiento y alimentación, así como las tuberías por ello es necesario que los materiales sean de buena calidad para evitar corrosión u oxidación que pueda afectar al suelo o a la vegetación.

La implementación de un humedal artificial ayuda a que se cumpla con la norma NADF-002-RNAT-2002 que establece las condiciones que debe cumplir la llamada agricultura ecológica, debido a que no se requieren estructuras complicadas, no se generan lodos y no altera la arquitectura del lugar, ayudando a preservar los suelos de conservación en la Ciudad de México.

## 9. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La agricultura en México ha sufrido un retroceso en los últimos años, eso es un problema grave ya que la cuarta parte de la población se dedica a actividades rurales y sólo aportan el 1.1% del PIB, esto genera problemas económicos y sociales en la población. Una de las principales causas ha sido la falta de agua sobre todo en el Distrito Federal, ocasionando que los suelos de conservación no cumplan con la normatividad vigente (NADF-002-RNAT-2002) impidiendo que se generen las condiciones para lograr una agricultura ecológica.

Para abastecer de agua los cultivos, en el caso de Xochimilco y Tláhuac, los agricultores realizan sus riegos con agua de los canales disminuyendo la calidad de sus productos y poniendo en riesgo la salud y el medio ambiente. Los datos en la literatura y los análisis hechos en el laboratorio, además de los testimonios de la gente demuestran que la calidad de agua de los canales de Xochimilco no es apta para su uso en riego agrícola. Esto se traduce en la baja calidad de los productos y en problemas de salud. Y consecuentemente muestra la necesidad de tomar medidas. Un sistema de tratamiento de agua puede resolver estos problemas e incluso mejorar la calidad del agua de los canales.

Analizando los diversos tipos de tratamientos se sabe que los humedales artificiales presentan una buena remoción de materia orgánica (80-90%) , agentes patógenos y parásitos (95%), contaminantes básicos (40-80%) y metales (25-85%).

Los análisis iniciales del agua de DQO y DBO<sub>5</sub> presentan una relación de 1.6, esto nos indica una buena biodegradabilidad, justificando la utilización del humedal.

Los experimentos desarrollados en este trabajo muestran una remoción del 73% de DBO<sub>5</sub> y 45-61% de DQO, con esto se lograría cumplir con la normatividad vigente.

El agua no muestra un efecto negativo en los carrizos, ya que estos presentaron un buen crecimiento del tallo en 5 meses en el sistema A de 122 cm y de 133.8 cm en el sistema B. Las raíces crecieron 20 cm de largo y presentaron un aumento en masa de 305 g en el sistema A y 304g en el sistema B. Esto es importante ya que al exponer este tipo de plantas a otro tipo de agua se ha percibido un efecto negativo, y esto nos indica que la elección de los carrizos es la adecuada.

El sistema C que contó únicamente de tezontle presento a su vez una buena remoción de DQO y DBO<sub>5</sub>, mostrando ser un sustrato eficiente, aunque esto nos indica que las plantas no representaron una diferencia significativa en cuanto a remoción de materia orgánica.

En cuanto a las pruebas realizadas en el reactor experimental, se pudo obtener la estimación de los parámetros de: porcentaje de remoción de materia orgánica medida como DBO<sub>5</sub> y DQO para conocer la biodegradabilidad y eficiencia del humedal, tiempo de residencia hidráulico, tipo y tamaño de partícula del material de soporte y pérdidas por evapotranspiración. Estos parámetros permitieron contar con la información útil para justificar el diseño a escala piloto de un Humedal Artificial con una capacidad de tratamiento de 2 m<sup>3</sup>/d, así como para la evaluación económica del proyecto. Los resultados remoción en los tres sistemas son significativos y con ello se justifica la implementación del HA.

Con esta información y con la caracterización del material de soporte fue posible la realización de los cálculos necesarios que dan las bases de diseño de la construcción del Humedal. El área calculada de 3.2 m<sup>2</sup> resulta muy conveniente porque disminuye los costos, éste tamaño se debe a que el porcentaje de remoción que debe tener el sistema no es muy grande, éste debe ser del 60.5%,



también se obtuvo que el TRH es de 11 horas, esto permite un buen control del humedal y cubre las necesidades de abastecimiento de agua en un tiempo razonable, además de lograr un abastecimiento de 730 000 L/año. Tomando en cuenta que se regaría una parcela por día.

En lo que respecta al análisis económico, se encontró que la inversión inicial necesaria para la implementación del humedal es de \$24,622.34 y que los costos por concepto de mantenimiento son de \$ 8,900 anuales. Esta estrategia se comparó con la de comprar agua tratada por medio de pipas. Tomando 5 años como frontera de valuación se obtuvieron los costos de cada estrategia, las cifras ascendieron a \$59,240.24 para el Humedal y a \$67,594.54 para las pipas, de este modo, si se optara por el Humedal se obtendría un margen de ahorro de \$8,354.30.

La TIR del proyecto fue del 36% y el periodo de recuperación de la inversión fue de 2 años y medio, la mejora en la calidad de los productos agrícolas y la reducción en el impacto ambiental son beneficios adicionales. De este modo se concluye que el humedal no sólo es un método efectivo de tratamiento, sino que también se puede ver como un proyecto de inversión rentable.

Existen otros tratamientos que implican un menor costo de inversión como los filtros de arena, pero que pueden ser deficientes en cuanto a remoción o bien debido a sus características físicas.

## 10. CONCLUSIONES

- La construcción del Humedal Artificial representa una buena alternativa para las zonas chinamperas de Xochimilco y algunos otros lugares como Tláhuac, donde la gente se dedica a actividades agrícolas especialmente a la siembra de hortalizas. Un Humedal Artificial representa claras ventajas para este tipo de lugares debido a que este tipo de tratamiento no altera las condiciones ecológicas de la zona y ayuda a cumplir la normatividad vigente NADF-002-RNAT-2002 y NOM-001-SEMARNAT-1996, sin mencionar un importante aporte en cuanto al cuidado del agua y medio ambiente de la Ciudad de México.
- Este tipo de propuestas de tratamiento brinda a los agricultores la oportunidad de contar con un sistema de abastecimiento de agua, eliminando una de las causas del abandono del campo que a su vez genera problemas como el alto crecimiento de la mancha urbana en el Distrito Federal.
- El sistema de tratamiento propuesto puede tratar 2000 L/d con un tiempo de retención hidráulico de 11 horas y un área de 3.2 m<sup>2</sup>, permitirá cumplir la NOM-001-SEMARNAT-1996 mejorando la calidad de agua actualmente usada por los agricultores de la zona de San Gregorio Xochimilco. Los HA ayudan al cumplimiento de normas y puede beneficiar zonas como las chinampas de Xochimilco donde es importante la implementación de sistemas que no alteren la ecología del lugar, incluso a la arquitectura del paisaje y que no generen lodos que dificulten el proceso. Los HA pueden ser utilizados para la producción de plantas de ornato debido a su apariencia.

- Los sistemas experimentales muestran un porcentaje de remoción adecuado que indica que el agua proveniente de los canales es biodegradable y puede ser tratada con un humedal artificial compuesto por carrizos y tezontle negro. Logrando el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-1996.
- Un Humedal Artificial no requiere altos costos de operación, es un proyecto rentable porque ofrece una TIR a 5 años de 46% y un VPN positivo a partir del tercer año, e incluso genera productos útiles, en el caso de las plantas de ornato el Humedal Artificial puede ser adaptado como un jardín en el cual se puedan producir otro tipo de plantas logrando ser un atractivo visual para los compradores.
- La construcción del humedal artificial se justifica económicamente porque la TIR evaluada a 5 años es de 46%, el valor presente neto evaluado a una tasa de 5, 10, 15 y 20% resulta positivo y muy superior a cero. Mostrando que el proyecto es rentable. La realización del presupuesto y la evaluación de la TIR y el VPN nos permite concluir que un HA es un proyecto rentable, en este análisis no se tomaron en cuenta los beneficios adicionales que pudieran tener los agricultores al ofrecer productos que cuenten con una mayor calidad, estos beneficios extras podrían traducirse en mayores ventas a causa de la mayor apertura al mercado al cumplir con normatividad y certificaciones como el sello verde.

## BIBLIOGRAFÍA

1. APHA. 1998. Standard methods for examination of water and wastewater analysis. 20<sup>th</sup> Ed. American Public Health Association. AWWA and WPFC. USA. Washington DC.
2. Agrios, G. 1991. Manual de las enfermedades de las plantas. Tomo I Ediciones Ciencia y Técnica, México.
3. Buchanan, B.B. y Gruissem, W. 2000. Biochemistry and Molecular Biology of Plants. American Society of Plants. Maryland, USA.
4. Cailleaux, A. 1978. Las rocas. Editorial Universitaria de Buenos Aires. 3<sup>a</sup> Ed. Argentina. Pp. 38-37.
5. Chapman, H.D. y Pratt P.F. 1973. Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas. Trillas. México.
6. Chávez, E.J. 2003. Determinación de la calidad microbiológica de hortalizas de mayor consumo en una zona de Xochimilco. Tesis profesional en Química en Alimentos. Facultad de Química. UNAM. México. Pp.8-17.
7. Cisneros, I.L.P. 2005. Aspectos ambientales relacionados con la calidad del agua en Xochimilco D.F. Tesis profesional en Biología. Facultad de Ciencias UNAM. México. Pp. 31-32
8. Cornejo, E.J. 2003. Propuesta de un tren de tratamiento de aguas residuales para riego agrícola en el ejido de San Juan Ixtayopa en Tláhuac D.F. Tesis profesional en Ingeniería Química. FES Zaragoza. UNAM.

9. Cornelius, K. 1997. Manual de Mineralogía. 4ª Ed. Reverté. España. Pp. 620-632.
10. Dumars, C. 1995. Suministro de Agua Mejorando la sustentabilidad, National Academy of Sciences. Environmental and Resources Research Council y Academia de Investigación Científica A.C. Washington D.C.
11. Enciclopedia Británica. Hombre, Ciencia y Tecnología. 1995. Océano, Barcelona.
12. García, C. 2003. Residencias, salones de fiestas y hasta albercas acaban con las chinampas de Xochimilco. La Crónica de Hoy. México D.F. 11 de septiembre de 2003.
13. Gómez de León, C.R. 2003. El crecimiento urbano, cambios en los usos del suelo y efectos en la hidrología; Xochimilco D.F. de 1930 a 2000. Tesis maestría en Diseño Urbano. Facultad de Arquitectura. UNAM. México. Pp. 75-78, 36-444.
14. Granados, F.E. 2004. Planeación y control de la elaboración de la ingeniería básica para un proyecto industrial. Tesis profesional en Ingeniería Química. Facultad de Química. UNAM. México.
15. Hammer D.A. 1989. Constructed Wetlands for wastewater treatment. Lewis publishers. Michigan. Pp 265-443.
16. Hernández, O.L. 2003. Agua para el Distrito Federal; sed en Tláhuac el impacto ambiental y socioeconómico provocado por la extracción de H<sub>2</sub>O de los mantos acuíferos de esta delegación política de la Ciudad de México. Tesis profesional en Ciencias de la Comunicación. Facultad de Ciencias Políticas y Sociales. UNAM. México. Pp 16-26 y 77-88.

17. INEGI. 2003. ABC de los indicadores de la Productividad 2ª Ed. México.
18. INEGI. 2004. Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos. Dirección general de coordinación de los sistemas nacionales, estadístico y de información geográfica.
19. INEGI. 2004. Cuaderno de información oportuna regional. No 79. Primer trimestre.
20. INEGI. 1988. Encuesta Nacional Agropecuaria Ejidal.
21. INEGI. 2005. Estadísticas del Medio Ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana. México.
22. INEGI. 1991. Secretaría de Agricultura, Ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación, por Delegaciones del Distrito Federal VII Censo Agrícola Ganadero.
23. Jackson. 1976. Análisis químico de los suelos. 3a Ed. Omega. Barcelona.
24. Jiménez, S.I. 2004. Evaluación de la concentración de metales pesados en suelos y hortalizas de la zona chinampera de Xochimilco de Xochimilco. Tesis profesional en Biología. FES Zaragoza. UNAM. México. Pp. 3-57.
25. Lincoln, L.C. 1987. Introducción a la estadística. CECOSA. México.
26. Mander. U. y Jenssen P.D. 2002. Natural Wetlands for waste water treatment in cold climates. Witpress Southampton. Boston. Pp 29-45.

27. Metcalf and Eddy. Inc. 1991. Wastewater Engineering, Treatment, Disposal and Reuse. 3a Ed. McGraw-Hill. USA.
28. Millán, H.S.E. 2000. Operación de una planta piloto tipo humedal artificial de flujo horizontal para tratamiento de aguas residuales y su reuso para riego. Tesis profesional en Ingeniería Química. Facultad de Química. UNAM. México.
29. Miranda, R.M. 2001. Desarrollo, situación actual y aplicaciones potenciales de los humedales artificiales de flujo horizontal en México. Tesis profesional en Ingeniería Química. Facultad de Química. UNAM. México.
30. Mohammad, P. 2002. Handbook of Crop Stress. Marcel Dekker Inc. New York.
31. Montovi, P. 2003. Application of a horizontal subsurface flow, constructed wetland on treatment of dairy parlor wastewater. Bioresource technology. 88. Pp 85-94.
32. Muller, G. 1991. Microbiología de los alimentos vegetales. Acribia. Zaragoza España. Pp. 61.
33. NADF-002-RNAT-2002 Establece las condiciones para la agricultura ecológica en el suelo de conservación del Distrito Federal.
34. NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO<sub>5</sub>) y residuales tratadas método de prueba. Diario Oficial de la Federación 6 de julio de 1981.

35. NMX-AA-030-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de la demanda de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba.
36. NOM-001-SEMARNAT-1996. Norma oficial mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación, Enero 6, 1996.
37. NOM-004-SEMARNAT-2002. Norma oficial mexicana. Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación, Agosto 15, 2003.
38. Ramírez, C.H.F. 1998. Desarrollo de la ingeniería básica para el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales a base de un humedal artificial de flujo horizontal. Tesis profesional en Ingeniería Química. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM. México.
39. Reyes, C.M.A. y Tovilla, H.C. 2002. Restauración de áreas alteradas con *Rhizophora mangle* en la Costa de Chiapas en Madera y Bosques. Número especial 1. Instituto de Ecología.
40. Rodier, J. 1990. Análisis de las aguas. Ediciones Omega. Barcelona.
41. Rojas, R.T. 1993. La agricultura chinampera, compilación histórica. 2ª Ed. Universidad Autónoma Chapingo. Pp. 129-322.
42. Ronzan, E. y Dapena, J. L. 1995. Tratamiento de las aguas residuales. Díaz de Santos. Madrid. Pp 3-19 y 431-481.



43. Rosen, P. 2005. Valuación de estrategias de inversión mediante opciones reales. Tesis en Actuaría. Facultad de Ciencias. UNAM. México.
44. Seoáñez, C.M. 1999a. Contaminación del suelo: estudios, tratamiento y gestión. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 352 p
45. Seoáñez, C.M. 1999b. Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales fundamentos científicos, tecnologías, diseño. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
46. Seoáñez, C.M. 1990. Aguas residuales urbanas, tratamientos de bajo costo y aprovechamiento. 2ª Ed. Mundi-Prensa. Barcelona.
47. Solano, M.L. y Soriano, P. C. M.P. 2004. Constructed Wetlands as a sustainable solution for waster treatment in small villages. Biosystems Engineering. 87(I),109-118.
48. Stephan O.E. y Zlotnik, E.A. 2001. La chinampa, evaluación y sustentabilidad. Patronato del parque ecológico de Xochimilco. AC. UAM, Ciudad de México. Pp. 59-62.
49. Valadez, L.A. 1994. Producción de hortalizas. Limusa. Pp. 37-211
50. Whitney, A.R. y Hayden. N. 2003. Evaluating an existing subsurface flow constructed wetland in Akumal. Mexico. Ecological Engineering 20, 105-III.

## ANEXOS

### 13A. Hoja de datos de la bomba

HOJA DE DATOS DE BOMBA CENTRIFUGA					
SERVICIO: <b>Bombeo de agua de canal a tanque de alimentación</b>			TAG(S): <b>P-103</b>		
CANTIDAD: <b>1 (Uno)</b>					
LUGAR DE INSTALACION: <b>Xochimilco</b>					
MARCA: *			TAMAÑO: *		
MODELO: *			TIPO: <b>CENTRIFUGA HORIZONTAL</b>		
CONDICIONES DE OPERACION					
FLUIDO:	Agua		PRESION DE DESCARGA:	1.60	Kg/cm <sup>2</sup>
TEMPERAT. DE BOMBEO:	20.00	°C	A FLUJO NORMAL:	1.60	Kg/cm <sup>2</sup>
FLUJO NORM./MÁX:	243.50	m <sup>3</sup> /hr	PRESION SUCCION:	1.02	Kg/cm <sup>2</sup>
GRAVEDAD ESPECIF.:	1.09	APROX.	PRESION DIFERENCIAL:	0.58	Kg/cm <sup>2</sup>
DENSIDAD:	1.099.00	Kg/m <sup>3</sup>	CARGA DINAMICA TOTAL:	5.28	m
VISCOSIDAD:	0.94	Cp.	NPSH DISPONIBLE:	7.10	m
PRESION DE VAPOR:	0.0323	Kg/cm <sup>2</sup>			
CONSTRUCCION					
CARCAZA: *			TIPO DE IMPULSOR: *		
TIPO DE MONTAJE: <b>Horizontal</b>			DIAMETRO DEL IMPULSOR: * mm.		
DIVISION: *			TIPO DE MONTAJE: *		
TIPO: *			TIPO DE COJINETES: *		
PRESION MAX. PERM.: * Kg/cm <sup>2</sup> (MAN.)			RADIAL Y EMPUJE: *		
PRUEBA HIDROSTATICA: * Kg/cm <sup>2</sup> (MAN.)			LUBRICACION: *		
CONEXIONES: *			SELLO MECANICO: <b>Tipo cartucho</b>		
TAMAÑO CONEXIONES: *			A) FABRICANTE: *		
(Ventoeo y dren): *			B) MODELO: *		
BOQUILLAS	TAMAÑO	RANGO	TIPO CARA	POSICION	COUPLE:
	(mm).				TIPO: *
SUCCION	*		F.F.	HORIZONT.	A) FABRICANTE: *
DESCARGA	*		F.F.	VERTICAL.	GUARDA COUPLE: *
MATERIALES DE CONSTRUCCION (S5)			COMPORTAMIENTO		
CARCASA: <b>Acero al carbón</b>			CURVA No. *		
IMPULSOR: <b>Acero al carbón</b>			NPSH REQUERIDO: * m.c.a.		
FLECHA: <b>Acero al carbón AISI 4140</b>			No. DE PASOS: <b>1</b>		
CAMISA DE FLECHA: <b>12% CROMO ENDURECIDO</b>			VELOCIDAD: * RPM		
PLACA DE DATOS: <b>Incluir</b>			MAX. BHP DISPONIBLES: *		
			MAX. CARGA DISPONIBLE: * m.c.a.		
			GASTO MIN. CONTINUO: * m <sup>3</sup> /hr		
PLAN DE LUBRICACION DEL SELLO: *			ROTACION VISTA DESDE EL COUPLE: *		
MATERIAL TUBING PLAN DE LAVADO: *			EFICIENCIA DE DISEÑO: <b>ALTA EFICIENCIA</b>		
MOTOR ELECTRICO					
No. DE CLIENTE: *			CLASIF. NEMA: <b>"B"</b>		
MARCA: *			FACT. SERVICIO: <b>1.15</b>		
ARMAZON: *			CONSTRUCCION: <b>T.C.C.V. TROPICALIZADO</b>		
TIPO: <b>JAULA DE ARDILLA</b>			CLASE AISLAMIENTO: <b>"F"</b>		
POTENCIA: * H.P.			TIPO ARRANQUE: <b>T.P.N.R.</b>		
VELOCIDAD: * RPM.			CAJA CONEXIONES: *		
TENSION/FASES/CICLOS: *			PESO: * Kg.		
TIPO DE EFICIENCIA: *			PLACA DE DATOS: *		
TIPO DE COJINETES: *			INCREMENTO MÁXIMO DE TEMP.: * °C		
LUBRICACION DE COJINETES: *			CORRIENTE A PLENA CARGA: * A		
OBSERVACIONES: * DATOS QUE DEBERA PROPORCIONAR EL FABRICANTE					

### 13B. Técnica de análisis DBO<sub>5</sub>

#### Reactivos y patrones

Todos los productos químicos usados en este método deben ser grado reactivo, a menos que se indique otro grado.

Agua: Debe entenderse agua que cumpla con las siguientes características:

- a) Resistividad, megohm-cm a 25°C: 0,2 mín.;
- b) Conductividad,  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 25°C: 5,0 máx., y
- c) pH: 5,0 a 8,0.

- Fosfato monobásico de potasio ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )
- Fosfato dibásico de potasio ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ )
- Fosfato dibásico de sodio heptahidratado ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )
- Cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )
- Sulfato de magnesio heptahidratado ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )
- Cloruro de calcio anhidro ( $\text{CaCl}_2$ )
- Cloruro férrico hexahidratado ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )
- Ácido sulfúrico concentrado ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
- Hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ )
- Sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ )
- 2-cloro-6 (triclorometil) piridina
- Glucosa grado patrón primario ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ )
- Ácido glutámico grado patrón primario ( $\text{C}_5\text{H}_9\text{NO}_4$ )
- Ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ )
- Ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ )
- Disolución amortiguadora de fosfato. Pesar aproximadamente 8,5 g de fosfato monobásico de potasio, 21,75 g de fosfato dibásico de potasio, 33,4 g de fosfato dibásico de sodio heptahidratado y 1,7 g de cloruro de amonio,

disolver en 500 mL de agua y aforar a 1 L. El pH de la disolución debe ser de 7,2. Desechar el reactivo (o cualquiera de los siguientes reactivos) si hay algún signo de crecimiento biológico en el frasco de almacenamiento.

- Disolución de sulfato de magnesio. Pesar aproximadamente 22,5 g de sulfato de magnesio heptahidratado, disolver en agua y diluir a 1 L.
- Disolución de cloruro de calcio. Pesar aproximadamente 27,5 g de cloruro de calcio anhidro, disolver en agua y diluir a 1 L.
- Disolución de cloruro férrico. Pesar aproximadamente 0,25 g de cloruro férrico hexahidratado, disolver en agua y diluir a 1 L.
- Disolución de ácido sulfúrico (0,1N). Agregar aproximadamente 2,8 mL de ácido sulfúrico concentrado a 500 mL de agua, mezclar bien y diluir hasta 1 L.
- Disolución de hidróxido de sodio (0,1N). Pesar aproximadamente 4,0 g de hidróxido de sodio, disolver en agua y diluir a 1 L.
- Disolución de sulfito de sodio. Pesar aproximadamente 1,575 g de sulfito de sodio, disolver en agua y diluir a 1 L. Esta disolución no es estable; por lo que debe prepararse diariamente.
- Disolución patrón de glucosa-ácido glutámico. Secar glucosa y ácido glutámico a 103°C durante una hora. Pesar aproximadamente y con precisión 150,0 mg de glucosa y 150,0 mg de ácido glutámico, diluir en agua y aforar a 1 L. Preparar inmediatamente antes de usarla. Esta disolución tiene una DBO<sub>5</sub> de 198 mg/L.
- Disolución de cloruro de amonio. Pesar aproximadamente 1,15 g de cloruro de amonio y disolver en 500 mL de agua, ajustar el pH a 7,2 con disolución de hidróxido de sodio y aforar a 1 L. La disolución contiene 0,3 mg N/mL.

## Equipo y materiales

### Equipo

### Equipo de aireación con difusor

- Incubador: Controlado por termostato a 20°C ± 1°C. Eliminar toda la luz para evitar la posibilidad de producción fotosintética de oxígeno disuelto.
- Balanza analítica con precisión de 0,1 mg

- Medidor de oxígeno disuelto

## Material

### Limpieza del material.

- Todo el material usado en la determinación debe ser exclusivo para este procedimiento. Para el lavado del material remojar durante 1 h en una disolución de ácido sulfúrico al 10 % y enjuagar con agua. Los detergentes con base de amoníaco no deben usarse para la limpieza del material.
- Los contenedores de las muestras deben lavarse con disolución de detergente no iónico, libre de metales, enjuagarse con agua, remojar en ácido toda la noche y volver a enjuagarse con agua libre de metales.
- Para el material de cuarzo, politetrafluoroetileno o material de vidrio debe dejarse remojando de 12 h a 24 h con HNO<sub>3</sub> (1:1), HCl (1:1) o con agua regia (3 partes de HCl concentrado + 1 parte de HNO<sub>3</sub> concentrado) a 70°C solo en los casos que presente material adherido, después debe ser enjuagado con agua libre de metales.
- En los casos de que el material presente grasas, enjuagar con acetona y/o hexano.
- Botellas Winkler de vidrio para incubación con capacidad de 300 mL de aforo total y con boca estrecha, reborde y tapón de vidrio esmerilado, de forma cónica.
- Contratapa de politetrafluoroetileno u otro material plástico para botella Winkler
- Bureta

### Recolección, preservación y almacenamiento de muestras

En el caso de aguas naturales debe tomarse un mínimo de 1 L de muestra en un envase de polietileno o vidrio. En el caso de aguas residuales (DBO<sub>5</sub> mayores a 50 mg/L) deben tomarse mínimo 100 mL. Pueden utilizarse muestras simples o compuestas.

No se debe agregar ningún preservador a las muestras. Solo deben conservarse a 4°C hasta su análisis.

- El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 24 h.

## Procedimiento

- Preparación de agua para dilución

Colocar el volumen requerido de agua en un frasco y añadir por cada litro de agua 1 mL de cada una de las siguientes disoluciones: disolución de sulfato de magnesio, disolución de cloruro de calcio, disolución de cloruro férrico y disolución amortiguadora de fosfatos. Preparar el agua de dilución diariamente.

Analizar y almacenar el agua de dilución, de tal forma que siempre tenga a mano agua de calidad garantizada. Antes de usar el agua de dilución debe ponerse a una temperatura aproximada de 20°C. Saturar con oxígeno aireando con aire filtrado, libre de materia orgánica durante 1 h por lo menos.

Si la muestra presenta alto contenido de biocidas como cloro o se sabe de su bajo contenido de materia orgánica, es necesario inocular la muestra.

Si se requiere, sembrar el agua de dilución como se indica en el inciso

### Inóculo

#### Fuente de la siembra

Es necesario contar con una población de microorganismos capaces de oxidar la materia orgánica biodegradable de la muestra. El agua residual doméstica, los efluentes no clorados o sin desinfección, los efluentes de las plantas de tratamiento de desechos biológicos y las aguas superficiales que reciben las descargas de aguas residuales que contienen poblaciones microbianas satisfactorias. Algunas muestras no contienen una población microbiana suficiente

(por ejemplo, algunos residuos industriales no tratados, residuos desinfectados, residuos de alta temperatura o con valores de pH extremos).

Para tales residuos, sembrar el agua de dilución añadiendo una población de microorganismos. La mejor siembra es la que proviene del efluente de un sistema de tratamiento biológico de aguas residuales. Cuando se usa como siembra el efluente de tratamiento biológico de sistema de aguas residuales se recomienda la inhibición de la nitrificación. Cuando no se disponga de ésta, utilizar el sobrenadante del agua residual doméstica después de dejarlo reposar a temperatura ambiente durante al menos 1 h, pero no más de 36 h. Determinar si la población existente es satisfactoria haciendo la prueba de la siembra en una muestra para  $DBO_5$ . El incremento del valor de la  $DBO_5$  indica una siembra exitosa.

#### Control del inóculo

Determinar la  $DBO_5$  del material de siembra como para cualquier otra muestra. Esto es una siembra control. A partir de este valor y de uno conocido de la dilución del material de siembra (en el agua de dilución) determinar el consumo de OD de la siembra. Lo ideal es hacer diluciones tales de la siembra que la mayor cantidad de los resultados presenten una disminución de al menos el 50 % del OD. La representación de la disminución del OD (mg/L) con respecto a los mililitros de siembra, tiene que ser una línea recta cuya pendiente corresponde a la disminución de OD por mililitro del inóculo. La intersección del eje de las abscisas (OD) representa el consumo del oxígeno causado por el agua de dilución y debe ser inferior a 0,1 mg/L. Para determinar el consumo de OD de una muestra, se resta el consumo de OD de la siembra, del consumo de OD total. La captación de OD total del agua de dilución sembrada debe oscilar entre 0,6 mg/L y 1,0 mg/L.

#### Pretratamiento de la muestra

#### Técnica de dilución

**Las diluciones que dan lugar a un OD residual mayor de 1 mg/L y una captación de OD de al menos 2 mg/L después de 5 días de incubación, producen los resultados más confiables. Hacer varias diluciones (al menos 3) por duplicado de la muestra preparada para obtener una captación de OD en dicho intervalo. La experimentación con una muestra concreta permite el uso de un número menor de diluciones. Un análisis más rápido tal como la DQO, presenta una correlación aproximada con la  $DBO_5$  y sirve como una guía para seleccionar las diluciones. En ausencia de datos previos, utilizar las siguientes diluciones: de 0 % a 1 % para los residuos industriales fuertes,**

de 1 % a 5 % para las aguas residuales sedimentadas y crudas, del 5 % al 25 % para el efluente tratado biológicamente y del 25 % al 100 % para las aguas superficiales contaminadas.

Diluciones preparadas directamente en frascos tipo Winkler. Utilizando una pipeta volumétrica, añadir el volumen de muestra deseado a frascos Winkler individuales de 300 mL. Añadir cantidades adecuadas del material de siembra a los frascos tipo Winkler o al agua de dilución. Llenar los frascos con suficiente agua de dilución, sembrada si es necesario, de forma que la inserción del tapón desplace todo el aire, sin dejar burbujas. No realizar diluciones mayores de 1:300 (1 mL de la muestra en un frasco). Determinar el OD inicial en uno de los frascos de cada una de las diferentes diluciones. En los frascos de los duplicados de cada una de las diluciones, Ajustar herméticamente el tapón, poner un sello hidráulico y la contratapa e incubar durante 5 días a 20°C.

Determinación del OD inicial

Método electrométrico

Blanco del agua de dilución. Emplear un blanco del agua de dilución como un control aproximado de la calidad del agua de dilución no sembrada y de la limpieza de los frascos de incubación. Junto con cada lote de muestras, incubar un frasco de agua de dilución no sembrada. Determinar el OD inicial y final como se especifica en los incisos. El consumo de OD no debe ser mayor de 0,2 mg/L y preferentemente no menor a 0,1 mg/L.

Incubación

Incubar a 20°C ± 1°C las botellas de DBO<sub>5</sub> que contengan las muestras con las diluciones deseadas, los controles de siembra, los blancos de agua de dilución y el control de glucosa-ácido glutámico. En caso de no contar con contratapas, diariamente se debe verificar que el sello hidráulico esté intacto en cada botella incubada, agregar agua si es necesario.



## Determinación del OD final

Después de 5 días de incubación determinar el OD en las diluciones de la muestra, en los controles y en los blancos. La medición del OD debe ser realizada inmediatamente después de destapar la botella de Winkler, para evitar la absorción de oxígeno del aire por la muestra.

### Cálculos

Calcular la  $DBO_5$

Cuando no se utilice inóculo ni diluciones:

$$DBO_5 \text{ (mg/L)} = OD_i \text{ mg/L} - OD_5 \text{ mg/L}$$

donde:

$OD_i$  mg/L es el oxígeno disuelto inicial, y  
 $OD_5$  mg/L es el oxígeno disuelto al quinto día.

11.1.2 Cuando se emplea una dilución:

$$DBO_5 \text{ (mg/L)} = \frac{OD_i \text{ mg/L} - OD_5 \text{ mg/L}}{\% \text{ de dilución expresado en decimales}}$$

Con dilución:

$$DBO_5 \text{ (m/L)} = \frac{[(OD_i \text{ mg/L} - OD_5 \text{ mg/L}) - \frac{C_1(B_1 - B_2)(V_t)}{C_2(V_m)}]}{P}$$

donde:

$B_1$  es el OD del inóculo antes de la incubación, en mg/L;

$B_2$  es el OD del inóculo después de la incubación, en mg/L;  
 $C_1$  es el volumen de inóculo en la muestra;  
 $C_2$  es el volumen de inóculo en el inóculo control;  
 $V_t$  es el volumen total del frasco Winkler, y  
 $V_m$  es el volumen de muestra sembrada.

Expresar los resultados como  $CDBO_5$  si se inhibe la nitrificación.

Reportar los resultados en mg/L de  $DBO_5$  con dos cifras significativas con la precisión (media, desviación estándar) correspondiente.

### 13C. Técnica de análisis de DQO

#### Reactivos y patrones

Todos los productos químicos usados en este método deben ser grado reactivo, a menos que se indique otro grado.

Agua: Debe entenderse agua que cumpla con las siguientes características:

- a) Resistividad: megohm-cm a 25°C: 0,2 min.;
- b) Conductividad:  $\mu\text{S/cm}$  a 25°C: 5,0 máx., y
- c) pH: 5,0 a 8,0.

#### Método reflujado cerrado / método espectrofotométrico

- Ácido sulfúrico concentrado ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
- Dicromato de potasio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ )
- Sulfato mercúrico ( $\text{HgSO}_4$ )
- Sulfato de plata ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ )
- Biftalato de potasio patrón primario ( $\text{HOOC}_6\text{H}_4\text{COOK}$ )
- Disolución estándar de biftalato de potasio (1 mL = 1 mg de DQO). Deshacer los grumos y secar el biftalato de potasio a 120°C. Pesar aproximadamente y con precisión 0,851 g de biftalato de potasio, disolver en agua y aforar a 1 L. Es estable hasta por 3 meses cuando se mantiene en refrigeración y si no se observa crecimiento biológico.
- Disolución de sulfato de plata en ácido sulfúrico. Pesar aproximadamente y con precisión 15 g de sulfato de plata y disolver en 1 L de ácido sulfúrico concentrado. El sulfato de plata requiere un tiempo aproximado de dos días para su completa disolución. La disolución formada debe mantenerse en la obscuridad para evitar su descomposición.
- Disolución de digestión A (alta concentración). Pesar aproximadamente y con precisión 10,216 g de dicromato de potasio, previamente secado a 103°C por 2 h, y añadirlos a 500 mL de agua, adicionar 167 mL de ácido sulfúrico concentrado y aproximadamente 33,3 g de sulfato mercúrico. Disolver y enfriar a temperatura ambiente. Aforar a 1 L con agua.
- Disolución de digestión B (baja concentración). Pesar aproximadamente y con precisión 1,021 6 g de dicromato de potasio, previamente secado a

103°C por 2 h, y añadirlos a 500 mL de agua. Adicionar 167 mL de ácido sulfúrico concentrado y 33,3 g de sulfato mercúrico. Disolver y enfriar a temperatura ambiente. Aforar a 1 L con agua.

#### Método reflujado abierto / método de titulación

- Dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ )
- Sulfato ferroso amoniacal hexahidratado ( $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ )
- Ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ )
- Sulfato de plata ( $Ag_2SO_4$ )
- 1,10-fenantrolina ( $C_{12}H_8N_2$ )
- Sulfato mercúrico ( $HgSO_4$ )
- Biftalato de potasio patrón primario ( $HOOC C_6H_4 COOK$ )
- Sulfato ferroso heptahidratado ( $FeSO_4 \cdot 7 H_2O$ )
- Disolución estándar de dicromato de potasio (para concentraciones altas), (0,041 7 M). Pesar aproximadamente y con precisión 12,259 g de dicromato de potasio previamente secado durante 2 h a  $105^\circ C \pm 1^\circ C$ , disolver y aforar a 1 L con agua y homogeneizar.
- Disolución estándar de dicromato de potasio (para concentraciones bajas), (0,004 17 M). Pesar aproximadamente y con precisión 12,259 g de dicromato de potasio previamente secado durante 2 h a  $105^\circ C \pm 1^\circ C$ , disolver y aforar a 1L con agua y homogeneizar.
- Disolución de sulfato ferroso amoniacal (0,25 M); disolver en aproximadamente 800 mL de agua aproximadamente 98,0 g de sulfato ferroso amoniacal hexahidratado, agregar cuidadosamente 20 mL de ácido sulfúrico concentrado, enfriar, llevar a 1 L con agua y homogeneizar.
- Normalización de la disolución de sulfato ferroso amoniacal (0,25 M). Tomar una alícuota de 10 mL de la disolución estándar de dicromato de potasio 0,041 7 M. Diluir con agua hasta 100 mL, agregar cuidadosamente 30 mL de ácido sulfúrico concentrado y homogeneizar, enfriar y valorar con la disolución de sulfato ferroso amoniacal 0,25 M, utilizando 3 gotas de 1,10-fenantrolina como indicador, hasta el cambio de color de

azul verdoso a café rojizo. Esta disolución debe normalizarse cada vez que se utilice.

- Disolución de sulfato ferroso amoniacal (0,025 M). Diluir 100 mL de la disolución de sulfato ferroso amoniacal 0,25 M (ver inciso 4.2.11) a 1 L. Valorar con la disolución de dicromato de potasio 0,004 17 M.
- Disolución de ácido sulfúrico-sulfato de plata. Disolver cristales o polvo de sulfato de plata, en ácido sulfúrico concentrado en una relación 5,5 g  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  /Kg  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Se requieren de 1 a 2 días para que se disuelva completamente el sulfato de plata.
- Disolución indicadora de 1,10-fenantrolina. Pesar aproximadamente y con precisión 1,485 g de 1,10-fenantrolina y aproximadamente 0,695 g de sulfato ferroso heptahidratado, diluir y aforar a 100 mL con agua y homogeneizar.
- Disolución estándar de biftalato de potasio (500 mg  $\text{O}_2$ /mL). Pesar aproximadamente y con precisión 0,425 g de biftalato de potasio patrón primario previamente secado a  $120^\circ\text{C}$  durante 2 h, disolver y aforar a 1 L con agua. El biftalato tiene una DQO teórica de 1,176 mg  $\text{O}_2$ /mg de Biftalato, por lo que la DQO teórica de esta disolución es de 500 mg  $\text{O}_2$ /mL. Esta disolución es estable hasta por 3 meses si se mantiene en refrigeración y en ausencia de crecimiento biológico visible.

## Equipo y materiales

Sólo se mencionan los equipos y materiales que son de relevancia para este método.

### Método de reflujo cerrado / método espectrofotométrico

#### Equipo

Placa de calentamiento con horadaciones para los tubos de reacción de DQO que alcance una temperatura de  $150^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ .

Espectrofotómetro. Disponible para utilizarse de 190 nm a 900 nm y equipado con celdas de 1 cm de paso óptico de luz o tubos de 16 mm x 100 mm de calidad espectro.

#### Material

Todo el material volumétrico utilizado en este método debe ser de clase A con certificado, o en su caso debe estar calibrado.

Tubos para digestión, 16 mm x 100 mm con tapa con cubierta interior de TPF.

Barras magnéticas cubiertas de TPF.

Método de reflujo abierto / método de titulación

Equipo

Equipo de destilación con parrilla de calentamiento que asegure la ebullición del contenido del matraz de reflujo y condensadores tipo Friedrich, con mangueras.

Material

Todo el material volumétrico utilizado en este método debe ser de clase A con certificado, o en su caso debe estar calibrado.

Bureta

Recolección, preservación y almacenamiento de muestras

La muestra se debe analizar inmediatamente después de su toma, en caso contrario debe conservarse en refrigeración a 4°C, además de la adición de ácido sulfúrico hasta  $\text{pH} < 2$ .

El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 28 días.

Procedimiento

Método a reflujo cerrado/ método espectrofotométrico

Precalentar a 150°C el digestor de DQO

Colocar en los tubos de reacción 1,5 mL de la disolución de digestión A o B

Tomar cuidadosamente 2,5 mL de muestra previamente homogeneizada dentro de los tubos de reacción. Cerrar inmediatamente para evitar que se escapen los vapores, asegurarse de que están herméticamente cerrados. Suavemente invertir los tubos varias veces destapando después de cada inversión para liberar la presión.

NOTA.- La disolución es fuertemente ácida y el tubo se calienta en este proceso, trabajar con guantes aislantes.

Añadir cuidadosamente 3,5 mL de la disolución de digestión respectiva.

Colocar 2,5 mL de agua en un tubo para la determinación del blanco de reactivos.

Colocar todos los tubos en el digestor previamente calentado a 150°C y reflujar por 2 h.

Retirar los tubos del digestor y dejar que los tubos se enfrien a temperatura ambiente, permitiendo que cualquier precipitado se sedimente.

Medir la absorbancia en el espectrofotómetro, previamente calibrado o cuantificar por titulación.

Para aguas que contengan una DQO baja (5 mg/L a 75 mg/L), utilizar la disolución de digestión B (ver inciso 4.1.9). Si el valor de la DQO determinado es más alto que 75 mg/L después de usar estos reactivos, reanalizar la muestra, utilizando la disolución A.

Cálculos

Método de reflujo cerrado / método espectrofotométrico:

Calcular la DQO en la muestra en miligramos por litro (mg/L) directamente de la curva de calibración, con la ecuación 1.

$Y = mX + b$  Ecuación 1

Reportar los resultados en mg/L.