

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



APLICACION DE EFLUENTES INDUSTRIALES
EN IRRIGACION

T E S I S

Que para obtener el Título de

Ingeniero Químico e
Ingeniero Químico Metalúrgico

P R E S E N T A N

GRACIELA LARIOS NANDO
SILVIA FLORES CABRERA
RAMON FERNANDO BACA AGUILAR

México, D. F.

1977



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CLAS. Tesis 1977
ABO. 14-39 39
FECHA _____
PREGO _____
• _____



QUIMICA

RECONOCIMIENTOS

Se dedican las presentes líneas para agradecer en conjunto a todas aquellas personas, que directa o indirectamente, colaboraron en la formación de ésta tesis, mención especial la tienen, el personal técnico del Centro de Investigación y Entrenamiento para el Control de la Calidad del Agua, de la S. R. H. Así mismo, hacemos patente nuestra gratitud al grupo de maestros de la Facultad de Química, quienes desinteresadamente se prestaron a dirigir y evaluar nuestro trabajo, a través de la integración del sínodo constituido por los profesores: Jorge Spamer García Conde, Presidente; José Luis Padilla de Alba Vocal; Ricardo Albarrán Luna, Secretario y Asesor de la Tesis; Carlos Romo Medrano, Primer Suplente; Alberto de la Fuente Zuno, Segundo Suplente.

Individualmente, se quiere hacer mención en éste trabajo, a aquellas personas, que desligadas de nuestra vida escolar propiamente dicha, contribuyeron económica, moral o afectivamente a su obtención, y a quienes, a través de las siguientes dedicatorias se les agradece y recuerda con cariño.

A mis Padres	A mis Padres	A mi Padre †
A mi Hija	A mis Hermanas	A mi Madre y Hermanos
A Ramón	A Zenen	A mi Familia y Amigos
A Lupita	A mis Familiares y Amigos	A Ernesto, Enrique, Mario y demás compañeros de trabajo
A mis Hermanos	A Marianita	A Graciela y Marcela
A mis Familiares y Amigos		

GRACIELA

SILVIA

RAMON FERNANDO

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS

LISTA DE FIGURAS

EXTRACTO

PROLOGO

INTRODUCCION

Objetivos

Alcances y Limitaciones

- Cap I DISPONIBILIDAD, USOS Y DEMANDAS DE AGUA EN MEXICO
I-1 Descripción de los Recursos Hidráulicos del País
I-2 Demanda y Consumo de Agua en el Sector Doméstico
I-3 Demanda y Consumo de Agua en el Sector Industrial
I-4 Demanda y Consumo de Agua en el Sector Agrícola
I-5 Resúmen y Discusión
- Cap II GENERACION DE AGUA RESIDUAL EN MEXICO
II-1 Volúmen y Calidad del Agua Residual Generada
 II-1-1 Sector Doméstico
 II-1-2 Sector Industrial
II-2 Efectos de la Disposición Libre del Agua Residual en los
 Cuerpos Receptores
II-3 El Agua Residual como Recurso Hidráulico
- Cap III FACTIBILIDAD TECNICA DEL REUSO DE AGUAS RESIDUALES
III-1 Reutilización del Agua Residual en la Industria
 III-1-1 Generalidades sobre la calidad del Agua en la
 Industria
 III-1-2 Calidad del Agua en Función del Uso
 III-1-3 Calidad del Agua para Distintas Industrias
 III-1-4 Alternativas de Tratamiento
 III-1-5 Descripción de los Procesos de Tratamiento
 III-1-6 Costos de Tratamiento
 III-1-7 Atractivos del Reuso y Aplicación Actual
III-2 Reutilización del Agua Residual en la Agricultura
 III-2-1 Calidad de Agua Requerida
 III-2-2 Necesidades y Sistemas de Tratamiento
III-3 Conclusiones

Cap IV ESTUDIO PILOTO DE LA REUTILIZACION DE AGUA RESIDUAL
EN LA AGRICULTURA

IV-1 Introducción

IV-2 Antecedentes y Metodología del Estudio

IV-2-1 Descripción de la Zona de Estudio

IV-2-2 Programa de Caracterización

IV-2-3 Técnicas Analíticas

IV-3 Discusión de Resultados

IV-3-1 Fertilización

IV-3-2 Salinidad

IV-3-3 Metales Pesados y Sustancias Tóxicas

IV-3-4 Aspectos Bacteriológicos

IV-3-5 Problemas Especiales de Afectación y Estudios
de Autodepuración

IV-4 Conclusiones

IV-5 Recomendaciones

Apéndice A TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON LIRIO
ACUATICO

Apéndice B CRITERIOS PARA LA CLASIFICACION DE SUELOS Y
TOLERANCIAS DE CULTIVOS

REFERENCIAS

LISTA DE CUADROS

- I-1 DEMANDAS GLOBALES DE AGUA EN EL SECTOR DOMESTICO
- I-2 CLASIFICACIÓN FUNCIONAL DE USOS DEL AGUA EN LOS PRINCIPALES SECTORES INDUSTRIALES
- I-3 DEMANDA TOTAL, RELATIVA Y CONSUMO DE AGUA EN LOS SECTORES INDUSTRIALES
- I-4 DISTRIBUCION GEOGRAFICA DE LA DEMANDA DE AGUA INDUSTRIAL
- I-5 AREAS CON POTENCIAL AGRICOLA EN MEXICO
- I-6 RESUMEN DE DATOS SOBRE EXTRACCION Y CONSUMO DE AGUA EN MEXICO

- II-1 CARACTERISTICAS PROMEDIO DE AGUAS RESIDUALES POR AMBITO DE POBLACION EN LA REPUBLICA MEXICANA
- II-2 GENERACION DE AGUA RESIDUAL A NIVEL NACIONAL EN LA PRODUCCION DE AZUCAR. AÑO DE 1973.
- II-3 DISTRIBUCION DE LA PRODUCCION Y DESCARGA DE AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA DE LA CELULOSA Y EL PAPEL. (1973).
- II-4 DEMANDA, CONSUMO Y DESCARGA DE AGUA EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
- II-5 PRODUCCION, DEMANDA Y DESCARGA DE AGUA EN LA INDUSTRIA TEXTIL MEXICANA
- II-6 CARACTERISTICAS PROMEDIO DEL AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA QUIMICA

- III-1 CALIDADES DE AGUA REQUERIDAS PARA ENFRIAMIENTO
- III-2 CALIDAD DE AGUA REQUERIDA PARA CALDERAS
- III-3 CALIDAD DE AGUA REQUERIDA POR LA INDUSTRIA DEL PAPEL Y LA CELULOSA

- III-4 NORMAS DE CALIDAD DE AGUA PARA LA ELABORACION DE DIFERENTES TIPOS DE CELULOSA Y PAPEL
- III-5 CALIDAD DE AGUA REQUERIDA POR LA INDUSTRIA TEXTIL
- III-6 CALIDAD DE AGUA REQUERIDA POR LA INDUSTRIA DE PRODUCTOS QUIMICOS
- III-7 CALIDAD DE AGUA REQUERIDA POR LA INDUSTRIA DEL CURTIDO Y ACABADO DE PIELES
- III-8 CALIDAD DE AGUA REQUERIDA POR LA INDUSTRIA DEL PETROLEO Y CARBON MINERAL
- III-9 CALCULO DE LAS INVERSIONES POR TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
- III-10 INVERSIONES Y COSTOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
- III-11 CAPACIDAD Y TIPO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO EN OPERACION
- III-12 CLASIFICACION DE LAS AGUAS DE RIEGO EN FUNCION DE LA CONCENTRACION DE SOLIDOS TOTALES DISUELTOS Y CONDUCTIVIDAD ELECTRICA
- III-13 CLASIFICACION DE LAS AGUAS DE RIEGO EN FUNCION DEL CARBONATO DE SODIO RESIDUAL
- III-14 CLASIFICACION DEL AGUA DE RIEGO SEGUN EL CONTENIDO DE BORO
- III-15 CONCENTRACIONES DE MANGANESO EN EL AGUA DE RIEGO DAÑINAS A ALGUNOS CULTIVOS
- III-16 CLASIFICACION DEL AGUA DE RIEGO SEGUN SU SALINIDAD POTENCIAL
- III-17 CLASIFICACION DEL AGUA DE RIEGO SEGUN SU PORCIENTO DE SODIO POSIBLE
- III-18 CONCENTRACIONES MAXIMAS PERMISIBLES DE METALES PESADOS EN AGUAS DE RIEGO
- III-19 CONCENTRACIONES MAXIMAS PERMISIBLES DE ELEMENTOS TOXICOS EN AGUAS DE RIEGO
- III-20 LIMITES PERMISIBLES DE PLAGICIDAS

- III-21 POTENCIAL DE RIEGO Y COSTOS DE TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL

- IV-1 ANALISIS RUTINARIOS EN SUELOS
- IV-2 CONCENTRACION DE NUTRIENTES POR CLASE DE AGUA DE RIEGO
- IV-3 APORTACIONES DE NUTRIENTES POR LAS AGUAS DE RIEGO APLICADAS EN EL DISTRITO DE RIEGO 03
- IV-4 CARACTERISTICAS PROMEDIO DE FERTILIDAD DE LOS SUELOS DEL DISTRITO DE RIEGO 03
- IV-5 RENDIMIENTOS AGRICOLAS EN EL DR-03 OBTENIDOS CON RIEGO DE AGUAS NEGRAS, BLANCAS Y MEZCLADAS
- IV-6 AREAS DEL DR-03 AFECTADAS POR SALES
- IV-7 PARAMETROS CALCULADOS PARA ANALIZAR LOS EFECTOS DE SALINIDAD EN AGUAS DE RIEGO DEL DR-03
- IV-8 CONCENTRACION PROMEDIO DE METALES PESADOS Y SUSTANCIAS TOXICAS EN EL AGUA DE RIEGO DEL DR-03
- IV-9 CONCENTRACIONES PROMEDIO DE METALES PESADOS EN SUELOS DEL DR-03
- IV-10 CONCENTRACIONES DE PLAGUICIDAS ENCONTRADAS EN AGUAS, FORRAJES Y LECHE
- IV-11 CARACTERISTICAS BACTERIOLOGICAS DE LAS AGUAS DE RIEGO UTILIZADAS EN EL DR-03
- IV-12 CARACTERISTICAS BACTERIOLOGICAS DE ALGUNOS CULTIVOS DEL DR-03 REGADOS CON LAS DIFERENTES CLASES DE AGUA
- IV-13 CARACTERISTICAS DE CONTROL PARA AGUAS RESIDUALES EMPLEADAS EN RIEGO

- A-1 RESUMEN DE DATOS HIDROMETRICOS
- A-2 CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS DEL AGUA INICIAL DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACION

- A-3 POBLACION FITOPLANCTONICA DE LOS MODELOS DE LAGUNAS DE TRATAMIENTO
- A-4 POBLACION FITOPLANCTONICA DE LOS MODELOS DE LAGUNAS DE TRATAMIENTO . Continuación
- A-5 POBLACION ZOOPLANCTONICA DE LOS MODELOS DE LAGUNAS DE TRATAMIENTO
- A-6 CARACTERISTICAS BACTERIOLOGICAS DE LAS AGUAS DE LAS LAGUNAS DE TRATAMIENTO
- A-7 CARACTERISTICAS BACTERIOLOGICAS DE LAS AGUAS DE LAS LAGUNAS DE TRATAMIENTO
- A-8 VARIACION DE COLORACION DE LAS AGUAS DE LAS LAGUNAS DE TRATAMIENTO
- A-9 CAPACIDAD REPRODUCTIVA DEL LIRIO ACUATICO EN LAS LAGUNAS DE TRATAMIENTO
- A-10 RESUMEN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

- B-1 CLASIFICACION DE SUELOS EN FUNCION DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA Y EL % DE SODIO INTERCAMBIABLE
- B-2 CONCENTRACIONES DE MICRONUTRIENTES EN SUELOS
- B-3 NUTRIENTES CONTENIDOS EN DIFERENTES CULTIVOS
- B-4 CANTIDADES DE METALES PESADOS TOMADOS DEL EL SUELO POR DIFERENTES CULTIVOS
- B-5 EFECTO DEL SODIO APLICADO COMO NUTRIENTE SOBRE DIFERENTES ESPECIES CULTIVADAS
- B-6 CONCENTRACIONES DE MICRONUTRIENTES EN CULTIVOS
- B-7 TOLERANCIA DE CULTIVOS A LA CONCENTRACION DE CLORUROS
- B-8 TOLERANCIA DE CULTIVOS AL PORCENTAJE DE SODIO INTERCAMBIABLE

LISTA DE FIGURAS

- I-1 REGIONES DEL PLAN NACIONAL HIDRAULICO
- III-1 DIAGRAMA DE FLUJO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
- III-2 DIAGRAMA DE CLASIFICACION PARA AGUAS DE IRRIGACION
- III-3 CLASIFICACION DEL AGUA RESPECTO AL CONTENIDO DE SODIO Y SALES
- IV-1 PLANO GENERAL DEL DISTRITO DE RIEGO 03
- IV-2 CROQUIS DEL SISTEMA HIDROLOGICO DEL DR-03
- IV-3 REDES DE MUESTREO DE AGUAS SUELOS Y CULTIVOS
- IV-4 CICLO DEL NITROGENO EN LA NATURALEZA
- A-1 MODELO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACION CON PLANTAS ACUATICAS
- A-2 CONDICIONES DE OPERACION DE LOS MODELOS
- CONCENTRACION DE PARAMETROS EN EL INFLUENTE Y EFLUENTE DE LOS MODELOS
- A-3 DBO
- A-4 DQO
- A-5 SST
- A-6 SSF
- A-7 SSV
- A-8 NTK
- A-9 N_2-NO_3
- A-10 PO_4^{3-}
- A-11 SAAM
- A-12 ESQUEMA DE LOS PROCESOS BIOQUIMICOS EN LAS LAGUNAS DE TRATAMIENTO

- B-1 CLASIFICACION DE SUELOS POR TEXTURA
- B-2 NOMOGRAMA PARA DETERMINAR EL VALOR DEL RAS DE UN EXTRACTO DE SATURACION Y PARA ESTIMAR EL VALOR CORRESPONDIENTE DEL PSI DEL SUELO CUANDO ESTA EN EQUILIBRIO CON EL SUELO
- B-3 INFLUENCIA DEL pH DEL SUELO EN EL APROVECHAMIENTO DE NUTRIMIENTOS

EXTRACTO

Se discute, en base al establecimiento del déficit de suministro de agua de primer uso en México, las alternativas de utilización de los recursos -- hidráulicos, prestando especial atención a la consideración del agua residual como un recurso potencial factible de ser aprovechado en algunos usos industriales, mediante la adopción de sistemas económicos de tratamiento y, principalmente, en la agricultura actividad ésta que es imprescindible intensificar, coadyuvando en una gran medida la aplicación directa de agua residual, siempre y cuando sean prevenidos y controlados los problemas - de contaminación química de suelos y bacteriológica de cultivos.

PROLOGO

La atención prestada a las relaciones que existen entre la absorción de tecnología, el financiamiento del sector industrial, la adaptación de los instrumentos de fomento al desarrollo industrial y el proceso de industrialización implica una filosofía sobre el papel que debe desempeñar el sector manufacturero en la etapa actual de desarrollo de la economía mexicana. La satisfacción de los grandes objetivos señalados en el proceso evolutivo del país corresponden a la incorporación de poblaciones marginadas a una ocupación plena y la descentralización industrial.⁽¹⁾

Estos objetivos generales de desarrollo y el papel que desempeña la política nueva en forma estratégica es conveniente analizarlos, ya que ellos definen las formas de crecimiento que debe adoptar el sector industrial para que pueda contribuir a alcanzar las metas de desarrollo del país en función de los usos del agua y prevención de la contaminación.

Al considerar la influencia de la infraestructura en la localización industrial, deben tener presente que mientras algunas actividades industriales se realizan en la mejor forma posible cerca de los lugares en que hay materia prima, otras tienen mucho mayor libertad de elección; ninguna industria puede ser completamente móvil en el sentido de que pueda ubicarse en cualquier parte, prescindiendo del clima, los recursos naturales, los servicios y diversiones. Se consideran los costos

mínimos como un objetivo adecuado, no sólo en las economías liberales, en las que pueden dar lugar a utilidades muy grandes, sino también en economías cerradas, en las que el objetivo es hacer el mejor uso posible de los recursos del país. Si no es vital la proximidad a las materias primas, los costos mas bajos de producción se obtendrán en donde sean buenas las comunicaciones, el agua, la electricidad y el combustible, además de que haya mano de obra económica. Cuanto mejores sean las comunicaciones, tanto menos importante es el que la fábrica esté cerca del mercado o de las materias primas. La fuerza de trabajo eficiente es en gran parte el resultado de buena educación y servicios sociales, en consecuencia, ha de reconocerse que las zonas escogidas para el desarrollo industrial no deben tener sólo recursos naturales favorables, sino que deben dotarse al menos con una parte de la infraestructura necesaria. Así pues, puede haber buenas razones sociales para la creación de Cd. Sahagún, pero las razones económicas fueron débiles; por otra parte, el desarrollo de Salamanca, aunque pueda tener limitaciones futuras, ha sido bastante acertado, pues la ciudad gozaba ya de excelentes comunicaciones y de una población con casa propia. Podría observarse, sin embargo, que desde el establecimiento de la refinería, Petróleos Mexicanos ha hecho inversiones considerables en la construcción de casas, escuelas, etc., y otras mejoras de la infraestructura, que una empresa privada no habría podido emprender. Sin ésta ayuda, Celaya e Irapuato habrían podido ser elegibles, y posiblemente lo sean aún como centros de desarrollo. (2)

La limitada disponibilidad de agua en nuestro país es indudablemente un elemento fundamental a considerar en toda estrategia de desarrollo industrial; el clima y la topografía mexicanos hacen que el agua sea mucho mas abundante en el sur que en el norte del país, con excepción de la franja de la costa noroccidental. De hecho, el problema principal en algunas zonas del sureste, no es llevar el agua a lugares donde escasea, sino controlar los ríos para evitar inundaciones. En las regiones del norte el subsuelo es la fuente principal de agua dulce y la vida en ellas está condicionada por la presencia o ausencia de agua. Es del dominio público que las capas acuíferas de la ciudad de México se han explotado excesivamente, con peligroso asentamiento del suelo como resultado y que ésta situación subsiste.

La incidencia de éstos hechos sobre el desarrollo industrial es, o debe ser profunda, porque la industria es por si misma un consumidor sustancial de agua, pero por otra parte es importante tener en mente que en un país todavía no desarrollado plenamente, una agricultura próspera es la base necesaria para el éxito de la industrialización. En consecuencia, una política correcta prescribe que, cuando el agua escasea, los usos agrícolas y domésticos deben ocupar el primer lugar. Así pues, no hay que estimular la industrialización en lugares que existe una agricultura próspera amenazada por escasez notoria de agua, ni tampoco en donde ésta se presenta probablemente por virtud de las demandas justificadas para el riego futuro.

Generalmente se reconoce la necesidad industrial de agua, pero raras veces se piensa en ella como un factor de importancia en la ubicación de las industrias. Incluso al empresario que trata de establecer una nueva fábrica en la ciudad de México o en sus alrededores, rara vez le disuaden las funestas advertencias de dificultades futuras, y se sienten contentos si pueden obtener el permiso de abrir un pozo que puede satisfacer sus necesidades inmediatas. Por otra parte, hay unas empresas ya existentes en el Distrito Federal, que están considerando angustiosamente la decisión muy seria de desplazarse a otros lugares precisamente por las dificultades que tienen con la escasez de agua.

Siendo la satisfacción de las necesidades básicas de la población uno de los principales objetivos a alcanzar dentro del actual contexto social y considerando que la conservación del medio ambiente es un asunto íntimamente ligado al tema de la calidad de la vida, los lineamientos generales de ésta tesis proponen que las externalidades inherentes a la escasa disponibilidad del recurso agua y su contaminación, sean debidamente ponderadas a fin de que las políticas de optimización de agua por medio de reciclaje interno, externo y reuso cíclico, encuentren un aliciente económico para su promoción.

INTRODUCCION

La viabilidad de los programas de desarrollo nacionales y aprovechamiento de los recursos naturales y humanos y el mismo bienestar de la población están íntimamente ligados a la disponibilidad en cantidad y calidad adecuada del agua necesaria. El requerimiento de agua en cantidades suficientes para permitir el desarrollo de las comunidades humanas ha sido reconocido desde tiempos inmemoriales, pero la necesidad de prevenir su contaminación y defender su calidad es un concepto que solo lentamente se ha empezado a generalizar en los últimos años. Entre los estudios en la materia, no existe la menor duda de que la degradación continua e incontrolable de la calidad de las aguas del país, comprometerá en forma irremediable la salud y el bienestar de la población y frenará en forma drástica los planes nacionales de desarrollo comercial, industrial y agrícola.

Existe cada vez una conciencia más clara de que los recursos hidráulicos son un patrimonio que no puede ser abusado indiscriminadamente y que sólo puede ser debidamente aprovechado conciliando usos competitivos en la industria, los municipios, la agricultura, la ganadería y otras actividades que los requieran, siendo el valor del agua definido por su uso real y potencial y el efecto de la contaminación evaluado en términos de los efectos adversos en su uso dentro de las cuatro grandes categorías siguientes: (3)

- Salud pública.

- Producción: Usos domésticos, industriales, municipales y agrícolas; pesca, generación de energía, navegación y transporte.
- Aspectos ecológicos: Preservación de los balances naturales de los sistemas ecológicos y conservación de las especies.
- Aspectos estéticos: Recreación.

Teniendo en cuenta los anteriores preceptos, se estimó conveniente enmarcar los estudios específicos sobre la aplicación de aguas residuales en la agricultura, con las alternativas para optimizar la aplicación del recurso mencionado en otros usos, a fin de destacar la importancia del trabajo aquí presentado. Dicho marco de referencia contempla la exposición del panorama nacional con respecto a la disponibilidad de fuentes de abastecimiento de agua de primera calidad, así como la identificación y caracterización de las principales demandas de agua en los tres principales sectores (doméstico, industrial y agrícola), y finalmente la caracterización de las descargas de aguas residuales, para lo cual, siendo la industria uno de los mayores consumidores de agua de primer uso y una de las principales fuentes de agua residual, se le presta mayor importancia, describiendo las alternativas de reuso interno y principalmente de reuso externo de aguas residuales domésticas. De igual forma se toma en cuenta que el crecimiento demográfico y el empleo cada vez mayor de servicios de alcantarillado aumentará en forma notable el caudal de aguas residuales domésticas haciéndose imperativo el proporcionar medidas adecuadas para su correcta disposición o proporcionar los servicios de tratamiento

para evitar la contaminación y degradación ecológica de los cuerpos receptores. Al respecto, dado que la tecnología de tratamiento de aguas residuales proviene en su mayoría, de países desarrollados, con énfasis en el empleo de procesos que hacen uso intensivo de equipo sofisticado, que dependen en gran parte de personal altamente capacitado y cuya implantación en México tiene pocas posibilidades a futuro inmediato, se hace incapié en los mecanismos de tratamiento de aguas residuales, estudiados y operados a nivel experimental por los autores de la presente tesis, y que ofrecen grandes atractivos económicos para su aplicación con fines de reutilizar agua residual en irrigación.

Los temas tratados son extensos y sus derivaciones conducen invariablemente a nuevos tópicos de investigación, por lo cual, para el correcto lineamiento y desenvolvimiento del presente estudio, se vió conveniente el establecimiento de los siguientes objetivos:

OBJETIVOS

- Determinar los usos, demandas y consumos de agua a nivel nacional en los sectores doméstico, industrial y agrícola.
- Estimar los volúmenes y calidades de las aguas residuales generadas en los sectores doméstico e industrial, analizando las alternativas de aprovechamiento de tal recurso hidráulico.

- Estudiar la factibilidad del aprovechamiento de aguas residuales en la industria y en riego agrícola.

Alcances y Limitaciones

Los estudios sobre reuso del agua en nuestro país se encuentran actualmente en vías de desarrollo por lo que es de esperarse que cualquier informe editado sobre tales aspectos, presente ciertas limitaciones sobre rubros específicos en etapa de confirmación. El llevar a cabo tales trabajos de investigación requiere de grandes inversiones, que en nuestro país solo pueden canalizarse a través de organismos gubernamentales cuyas fuentes de difusión dan a conocer a la opinión pública las principales conclusiones alcanzadas, solamente después de haber obtenido cierto grado de confirmación sobre el contenido de tales estudios, restando con ello la participación y el acceso a la información a personas interesadas en tan importantes tópicos.

En tales condiciones, cobra especial relevancia la presentación de los más importantes enfoques y resultados obtenidos en los estudios sobre la reutilización de agua residual en nuestro país y que nos ha tocado en suerte el participar en mayor o menor grado a su obtención, dejando con ello innumerables experiencias e inquietudes que es preciso poner a disposición del estudiante universitario con el fin de motivar a la profundización de los estudios cuyos resultados preliminares aquí se presentan, siendo este el principal alcance de la tesis.

Otros logros de menor impacto, mas no por ello de poca importancia son:

- Estudio sobre los diversos usos del agua en México y de las calidades requeridas para el agua en la industria y agricultura.
- Recopilación de datos sobre los diversos criterios existentes en cuanto a la clasificación de aguas, suelos y tolerancias en cultivos relacionados con el riego.
- Exposición de experiencias, resultados y conclusiones preliminares sobre la operación del modelo experimental de lagunas facultativas con lirio acuático, como alternativa viable, para la depuración de agua residual con fines de irrigación.

CAPITULO I

DISPONIBILIDAD, USOS Y DEMANDAS DE AGUA EN MEXICO

Los océanos constituyen los principales receptáculos de agua en la tierra y aunque ésta se encuentra en circulación continua, el volumen limitado de agua dulce con que cuenta el planeta condiciona en parte, el número de habitantes que pueda sostener. Para evitar una crisis en el futuro próximo, el gran desafío que se presenta a la humanidad consiste en hacer más efectivo el uso que hacemos de los cien kilómetros cúbicos de agua que diariamente corren hasta los océanos⁽⁴⁾, para lo cual es imperativo la conciliación de usos competitivos, prevención de la contaminación y liberación de volúmenes de agua de primera calidad, mediante técnicas de reuso.

I.1 Evaluación de los Recursos Hidráulicos en el País

Los recursos de agua del país se presentan como fases de un proceso de recirculación llamado ciclo hidrológico, que comprende el agua contenida en la atmósfera, en la tierra y en los océanos. La distribución aproximada de éste ciclo en el país fue determinada mediante la cuantificación, en primera instancia, de la precipitación media anual que resultó de 777, equivalentes a 1.5 billones de m³ anuales de los cuales se estima que aproximadamente el 74% se reincorpora nuevamente a la atmósfera a través de la evaporación, o bien se infiltra en acuí-

(5)

feros profundos sin aparecer posteriormente en las corrientes naturales.

Los restantes 390 miles de millones de m³ corresponden a escurrimientos anuales en todas las corrientes del país, siendo 360 por vía superficial y 30 de escurrimiento subterráneo principalmente en áreas como la península de Yucatán. La distribución del escurrimiento superficial es muy irregular, detectándose 13 regiones más o menos definidas por similitud de factores físicos, hidrológicos, económicos, sociales, geográficos y políticos, principalmente⁽⁵⁾. Estas regiones se presentan en la figura I-1, sobre las cuales cabe hacer los siguientes comentarios:

- La distribución porcentual de la disponibilidad potencial hidráulica es sumamente dispersa, ya que más del 67% de los escurrimientos superficiales son a través de cinco ríos, cuyas cuencas combinadas [Región del Papaloapan (VIII), Cuenca Grijalva-Usumacinta (IX), Regiones Pacífico Sur-Istmo (V) y Balsas (IV)], abarcan únicamente el 10% del territorio nacional. En las restantes nueve regiones, se localiza el 32.2% del potencial hidráulico, e incluye entre otras, las regiones Centro-Valle de México (XIII) con 0.11%; Centro-Lerma (XII), con 1.68% y las cuencas cerradas del norte con 1.07%; mismas donde se encuentran los asentamientos urbano-industriales más importantes del país, lo que significa que el 51% del territorio nacional cuenta únicamente con el 15% de los recursos hidráulicos disponibles⁽⁶⁾, siendo las regiones costeras y zonas situadas abajo de los 500 metros de altitud sobre el nivel del mar, las que poseen el 85% restante, para satisfacer las demandas del 26% de la población de México.

- El almacenamiento total disponible para el control y aprovechamiento de



<u>R E G I O N</u>		DISP. POT. MILL. M ³
I	PENINSULA DE BAJA CALIFORNIA	288
II	NOROESTE	24 900
III	PACIFICO CENTRO	16 520
IV	REGION BALSAS	51 250
V	PACIFICO SUR-ISTMO	48 770
VI	REGION BRAVO	5 800
VII	REGION GOLFO	38 770
VIII	REGION PAPALOAPAN	56 100
IX	CUENCA GRIJALVA USUMACINTA	111 860
X	PENINSULA DE YUCATAN	29 250
XI	CUENCAS CERRADAS DEL NORTE	4 220
XII	CENTRO-LERMA	6 650
XIII	CENTRO-VALLE DE MEXICO	454

Total 394 832

Ref:

Usos del Agua en la Industria
elaborado por el P.N.H de la
S.R.H. en febrero de 1973

REGIONES DEL PLAN NACIONAL HIDRAULICO

nuestros escurrimientos es de 120 mil millones de m^3 ; éste valor incluye el almacenamiento de 95 mil millones en vasos artificiales y 25 mil millones en lagos y vasos naturales⁽⁵⁾. Este almacenamiento es utilizado principalmente con fines de riego en las zonas áridas, donde el consumo actual de aguas es similar al volumen de extracción, estando actualmente con escasas posibilidades de incrementar los volúmenes de captación, dado que las obras hidráulicas operan a toda su capacidad. En las zonas húmedas, el almacenamiento es utilizado para control de avenidas y generación de energía, turbinándose 75 mil millones de m^3 en el año de 1970 para generar 14,270 GWH (14.27×10^{12} kilowatts-hora).

Por otra parte, la explotación intensiva de las aguas subterráneas en México empezó en el año de 1936⁽⁵⁾, estimándose que a la fecha, ya se tienen acuíferos con graves problemas, tales como los del Valle de Sto. Domingo, Baja California; la región Lagunera; la costa de Hermosillo y el Valle de Guaymas, en Sonora y el Valle de México. Sin embargo, no se dispone de mayor información sobre reservas de agua subterránea ni de estudios tendientes a la recarga de acuíferos agotados.

- Otros recursos secundarios son los resultantes de la desalación de agua de mar, que en regiones como la península de Baja California, son una fuente importante de abastecimiento de agua, siendo la planta mayor, la situada en Rosarito que surte al 50% de la población de Tijuana y tiene una capacidad de 28 mil m^3 por día, mismos que representan el 91.2% de la capacidad de producción en México. Esta planta operó con un costo

de producción , en el año de 1970, de 2.35 \$/ m³, que aún en la actualidad es muy alto para irrigación.

I-2 Demanda y Consumo de Agua en el Sector Doméstico.

La población censada en el año de 1970 fué de 48.2 millones de habitantes, de los cuales el 43% (20.7 millones), contaban con servicios de alcantarillado. Las dotaciones de diseño de agua potable para las poblaciones mexicanas varían de acuerdo a las condiciones climáticas del lugar y del tamaño de la comunidad, siendo los valores promedio en México de 125 l/hab-día en las comunidades rurales (menos de 10,000 habitantes) y aumentan gradualmente hasta llegar a dotaciones de 300 l/hab-día en las grandes ciudades. ⁽⁷⁾ En el cuadro I-1, se presenta un desglose de la demanda de agua en el sector doméstico en México para el año de 1970.

El crecimiento anual estimado de la población, en la república mexicana, es de 3.5%, lo que representa un incremento de población de 48.2 millones en 1970 a 135.4 millones de habitantes en el año 2000. ⁽³⁾ Esta población demandará en el año 2000 un volúmen de agua potable igual a 4.2 miles de millones de m³ por año, lo cual equivale al 2% de la extracción total de los recursos disponibles.

I-3 Demanda y Consumo de Agua en el Sector Industrial

La falta de una política de participación conjunta entre los sectores público y privado (industrial), motivó una serie de limitaciones en los estudios de

CUADRO I-1

DEMANDAS GLOBALES DE AGUA EN EL SECTOR DOMESTICO

Ambito de Población (1970)	Número de Poblaciones en México	Número de habitantes	Dotación de Agua Potable (l/hab-día)	Demanda Global ($m^3 \times 10^6$ /día)
- - 2 500	-	19 916 238	-	-
2 500- 10 000	1474	6 557 604	125	0.82
10 000- 50 000	251	4 722 857	175	0.83
50 000-100 000	30	2 122 570	250	0.53
100 000-800 000	28	5 974 576	300	1.79
Distrito Federal	1	6 874 165	300	2.06
Guadalajara	1	1 199 391	300	0.36
Monterrey	1	858 107	300	0.26
S u m a		48 225 238		6.65
Disponibilidad Potencial	-	3.95x10 ¹¹ m ³ /año. (100%)		
Extracción Total (1970)	-	1.25x10 ¹¹ m ³ /año. (32%)		
(2000)	-	2.10x10 ¹¹ m ³ /año. (53%)		
Demanda del Sector Doméstico (1970)	-	2.4 x10 ⁹ m ³ /año. (0.6%)		
(2000)	-	4.2 x10 ⁹ m ³ /año. (1.06%)		

planeación de los recursos hidráulicos nacionales, mismos en que se vió la necesidad de estimar usos y demandas de agua en base a coeficientes e índices reportados para la tecnología norteamericana, combinando éstos con los datos de valor de la producción industrial de los censos industriales recientes. A partir del año de 1974, la Secretaría de Recursos Hidráulicos inició una serie de estudios tomando como base los datos reales de empleo de agua en la industria mexicana, concretamente para los sectores industriales que a continuación se enlistan, haciendo la aclaración de que a la fecha, no se dispone de la información analizada para todos ellos, por lo que solo se hace referencia a los resultados de los estudios de aquellos sectores industriales que ya han sido terminados. (8)

Los principales sectores industriales estudiados en función de la demanda y consumo de agua en México son:

Industrias Alimenticia, Química Inorgánica Básica, Hierro y Acero, Celulosa y Papel, Petroquímica, Petrolera, Textil, Azucarera, Curtidora, Acabado de Metales y Vitivinícola.

La demanda de agua por la industria puede ser clasificada:

- 1) de acuerdo con el uso asignado al agua
- 2) de acuerdo con el tipo de industria que la demanda

De acuerdo con su uso, las cuatro categorías generalmente empleadas en la clasificación de agua para uso industrial son las siguientes: (9) cuadro I-2

- 1) Agua para calderas. (Generación de vapor o energía).
- 2) Agua para enfriamiento, pudiendo ésta categoría dividirse en dos grupos:

- ciclos cerrados, donde el agua de enfriamiento no entra en contacto con el producto que está siendo enfriado y ciclos abiertos, cuando el agua de enfriamiento tiene contacto directo con el producto.
- 3) Agua de Proceso, que incluye tanto el agua que es incorporada en la manufactura del producto terminado, como el agua que es empleada como producto de transporte o como ayuda en la fabricación del producto.
- 4) Agua para usos generales, incluyendo limpieza de las instalaciones, usos sanitarios y en algunos casos, riego de jardines y áreas verdes.

CUADRO I-2
CLASIFICACION FUNCIONAL DE USOS DEL AGUA EN LOS
PRINCIPALES SECTORES INDUSTRIALES

(% respecto al total)

Sector Industrial	Enfriamiento	Procesos	Calderas	Otros
Alimenticia y Azúcar	51.1	40.4	4.0	4.5
Química Inorgánica Básica	76.5	17.5	2.3	3.7
Hierro y Acero	85.2	7.1	1.0	6.7
Celulosa y Papel	34.3	62.9	1.8	1.0
Petrolera	90.2	3.7	4.8	1.3

Ref: 9

La información recopilada sobre demandas, usos y consumos fué procesada, resumiendo en los cuadros I-2 y I-3 los principales resultados de los cuales cabe hacer los siguientes comentarios:

- El sector industrial que mas agua demanda y consume (se entiende por

CUADRO I-3

DEMANDA TOTAL, RELATIVA Y CONSUMO DE AGUA EN LOS

SECTORES INDUSTRIALES

Sector Industrial	Demanda Total (m ³ x10 ⁶ /año)		Demanda Relativa (% del total en la Industria)		Consumo (m ³ x10 ⁶ /año)	
	1970	1980	1970	1980	1970	1980
Alimentos (1)	941	3036	51	55	97	312
Química	209	905	11	16	16	81
Metálica	198	727	10	13	13	46
Celulosa y Papel	118	396	6	7	7.6	25
Petróleo	35	107	3	2	4	12
Textiles	18	26	-	-	1.5	2.2
Electricidad	-	-	3	2	-	-
Otras Industrias	-	-	16	5	-	-

Notas: (1) Incluye la industria azucarera

Ref: 8

demanda, el agua extraída para algún uso específico, y consumo, al volumen de agua restante de los volúmenes de extracción y el retornado en estado líquido, siendo visualizado en numerosos casos que el grado de contaminación de los efluentes es tan intenso que la demanda y el consumo debieran ser iguales), es el del ramo de alimentos y dentro de éste, la actividad industrial que más agua emplea es la de los ingenios azucareros; le siguen en orden decreciente las industrias química inorgánica básica, metálica (especialmente la siderurgia), la celulosa y el papel y la petrolera.

- De la demanda total de agua, el 60% es empleada en enfriamiento, el 33% en procesos y el 7% restante, en calderas y otros usos, mas cabe aclarar, que las cifras anteriores no incluyen las demandas de agua para generación de electricidad en las plantas de la Comisión Federal de Electricidad, en primer lugar porque su clasificación es ambigua, incluyéndose en algunos estudios como un rubro independiente del uso industrial y llamado generación de energía; en segundo término, porque la estimación de usos, demandas y consumos son muy específicos. Para aclarar esto, se incluye un resumen extraído de la referencia 5:

" En 1970, la producción bruta en plantas de la Comisión Federal de Electricidad y la Compañía de Luz y Fuerza del Centro fué de 26×10^9 KWH, para lo cual se extrajeron $64.85 \times 10^9 \text{ m}^3$ para generar, con hidroeléctricas el 57% de esa energía; en cambio, solo se extrajeron $119 \times 10^6 \text{ m}^3$ de agua dulce para enfriamiento de algunas de las plantas térmicas con las que se generó el resto, ya que las que se encuentran en las costas se enfrían con agua de mar. El consumo total, consideran-

do la evaporación en los vasos que alimentan a las plantas hidroeléctricas, así como las pérdidas en las termoeléctricas, resultó de 500 millones de metros cúbicos. Se estima que para 1980, la extracción total crecerá a mil millones de metros cúbicos por año."

- Otra variable de suma importancia en la evaluación de los recursos hidráulicos es la regionalización de las demandas de agua del sector industrial, la cual se muestra en el cuadro I-4, considerando las trece regiones en que se acostumbra dividir el país. Los datos, que para el año de 1970 se muestran en dicho cuadro, muestran que las seis regiones con mayor demanda de agua industrial, en orden decreciente, son las siguientes:

- VIII- Papaloapan
- XIII- Valle de México
- VI - Río Bravo
- IV - Río Balsas
- VII - Del Golfo
- II - Noroeste

La demanda de agua para industrias específicas aparece bien definida en las principales zonas del país; así se tiene que en las regiones II (Noroeste), III (Pacífico Centro), IV (Balsas) y IX (Cuenca Grijalva-Usumacinta), la principal demanda de agua industrial es para la elaboración de alimentos y específicamente, para la industria azucarera. En las regiones VI (Bravo) y XIII (Centro-Valle de México), la demanda aparece más diversificada, siendo los principales consumidores de agua en estas regiones, los

CUADRO 1-4

DISTRIBUCION GEOGRAFICA DE LA DEMANDA DE AGUA INDUSTRIAL

Región Geográfica	Demanda (m ³ x10 ⁶ /año) 1970	Consumo (m ³ x10 ⁶ /año) 1970	Composición de la Demanda por Sectores Industriales (%)						
			Alimentos	Metálica	Química	C. y Papel	Minerales	Textiles	Otras
I	1.5	0.1							
II	120.8	12.3	90		4				6
III	11.7	11.6	92			4			4
IV	149.9	15.3	91					2	7
V	28.1	2.7							
VI	183.1	12.8		55	15	10		5	15
VII	128.8	13.1							
VIII	409.8	41.3	91	4					5
IX	14.2	1.5							
X	12.5	1.3							
XI	19.4	1.9							
XII	61.7	5.5							
XIII	272.8	21.6	6	15	28	23		9	

Ref. 9

sectores industriales: químico, metálico y de celulosa y papel.

I-4 Demanda y Consumo de Agua en el Sector Agrícola

El conocimiento que se tiene de los suelos del país es insuficiente, aunque diversas organizaciones han tratado de realizar estudios que conduzcan a estimaciones mas o menos confiables, en primera instancia sobre las superficies con potencial agrícola. Utilizando la información disponible, tanto de la Dirección de Agrología de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, como la de la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL), se han determinado 38 millones de hectáreas de suelos clasificados en unidades aptas para la agricultura, teniéndose además, 30 millones de hectáreas adicionales, parcialmente aprovechables.⁽⁵⁾ La distribución regional de ambas, se describe en el cuadro I-5.

Existen actualmente 4.1 millones de hectáreas con obras de riego, de las cuales 2.5 millones se explotan bajo control en 156 unidades y distritos de riego en el país.⁽¹⁰⁾ Así mismo, se estima que existen 13 millones hectáreas de temporal aprovechables en el país. La importancia de la presentación de éstas cifras estriba en que la productividad unitaria promedio de las áreas con riego es de 4,500 \$/ Ha-año (1975), mientras que en las de temporal, solo se alcanzan 1250 \$/ Ha-año, lo cual significa que a pesar que las áreas de temporal superan 3.25 veces a las de riego, la productividad total anual obtenida en éstas últimas, es mayor por 1.14 veces.

CUADRO 1-5

AREAS CON POTENCIAL AGRICOLA EN MEXICO

I R e g i ó n		Areas Aprovechables (miles de Has)	
		Totalmente	Parcialmente
I	P. de Baja California	480	1 572
II	Noroeste	9 840	2 960
III	Pacífico-Centro	2 020	2 780
IV	Balsas	2 444	3 108
V	Pacífico Sur-Istmo	3 216	184
VI	Bravo	3 520	4 360
VII	Golfo	6 408	3 448
VIII	Papaloapan	2 932	484
IX	Grijalva-Usumacinta	2 636	-
X	P. de Yucatán	1 664	3 827
XI	C. Cerradas del Norte	-	5 440
XII	Centro-Lerma	2 894	1 240
XIII	Centro-Valle de México	164	746
S u m a		32 218	30 149

Ref: 5

Se estima que el incremento de la productividad en áreas de riego alcanza la tasa de 2,8% anual y en las de temporal el 2.0%, cifras que comparadas con la tasa de crecimiento demográfico que es de 3.5% anual, nos indica la necesidad de incrementar las áreas de cultivo a fin de evitar que crezca el déficit de productividad actual que es de 2.5% (estimado en función del valor de la producción agrícola en México y el valor de las importaciones de productos agrícolas en el año de 1970⁽¹⁰⁾), con el consecuente impulso al desequilibrio de la balanza de pagos en México. Durante la presente década, además de incrementarse las productividades mencionadas, deberán abrirse al riego entre 0.9 millones y 2.5 millones de hectáreas a fin de satisfacer la demanda interna y tener excedentes para exportación que equilibren el valor de las importaciones de producto cuyo desarrollo no es permisible técnica o económicamente en el país.

Las cifras oficiales indican que de los 1.25×10^{11} metros cúbicos de extracción anual de agua, el 36% es para fines de irrigación, lo cual nos proporciona un volumen anual de 4.48×10^{10} metros cúbicos, cantidad apenas superior al volumen requerido para regar los 2.5 millones de hectáreas de los distritos de riego nacionales considerando una lámina promedio anual de riego de 1.68 m; esto nos indica la irregularidad de dichas cifras y por lo tanto el grado de confianza con que deben ser tomadas.

De cualquier forma, las cifras nos dan una idea de la magnitud del volumen de agua requerido por el sector agrícola, que representa el 95.2% del consumo anual de agua en todos los usos, incluyendo éstos a los

usos industriales, domésticos y generación de energía.

I-5 Resumen y Discusión

Las estimaciones globales sobre la disponibilidad de agua en las trece regiones en que se ha dividido el país, así como sobre los volúmenes de extracción y consumo en los diferentes sectores se presentan de una forma resumida en el cuadro I-6, de cuyas cifras es posible discurrir que en el año de 1970, se consumió aproximadamente el 10% de los 395 mil millones de metros cúbicos de escurrimiento anual disponible; la suma de extracciones para los diversos usos fué del 32%. Estas cantidades se elevarán a 14% y 53%, respectivamente en 1980, preeviéndose que las extracciones excederán al escurrimiento superficial y subterráneo en las regiones de Baja California y Centro-Valle de México, teniéndose, por consiguiente, que recurrir al agotamiento de sus reservas (acuíferos), o hacer transferencias desde otras regiones, como de hecho se está llevando a cabo en la zona metropolitana de la Cd. de México, actualmente.

En otras regiones, como la Centro-Lerma, Noroeste, las cuencas cerradas del norte y Bravo, se empiezan a detectar problemas locales, estando el resto de las regiones libres de problemas actuales y futuros gracias a los grandes volúmenes disponibles, por lo que deben ser tomadas muy en cuenta en las obras de planeación para la descentralización industrial.

En los sectores estudiados en función de sus demandas y consumos de agua, el sector agrícola destaca por los grandes volúmenes demandados anualmen-

te , mismos que en algunas regiones, como la Centro-Valle de México, Bravo, Baja California y Centro-Lerma, son insatisfechos aprovechando los recursos zonales. Por otro lado, ésta actividad económica presenta la característica de que el uso que hace del agua es disipativo, es decir, que el volumen retornado después del aprovechamiento es mínimo (5% de la extracción es retornado por vía superficial), lo que limita en gran forma cualquier política de aprovechamiento cíclico del recurso.

El renglón denominado generación de energía, presenta la mayor demanda de agua a nivel nacional, (19% de la disponibilidad potencial), siendo su consumo el más reducido, lo cual es explicable si se considera que el uso que en éste renglón se hace del agua demandada es el de aprovechar su energía potencial, sin ningún cambio en su ubicación territorial, calidad o volumen, en las plantas hidroeléctricas. Por otro lado, a pesar de que hay grandes pérdidas por evaporación en las plantas termoeléctricas, (10 a 15%), la calidad del agua demandada no es un requisito limitante, pudiendo aprovecharse agua residual en los intercambiadores de calor, que es el principal volumen demandado, como se hace actualmente en la planta termoeléctrica del Valle de México, en Santa Clara, Edo. de México.

Cabe hacer hincapié de que los volúmenes resultantes de la diferencia entre las cifras de extracción y consumo en los sectores doméstico e industrial, representan los caudales de agua residual, derivándose a partir de éstos, los problemas de contaminación de los cuerpos superficiales, que en México empezarán a cobrar importancia en regiones donde coincidentemente, la

disponibilidad potencial muestra cifras deficitarias, por lo que es urgente se dedique especial atención a las técnicas de optimización del recurso hidráulico, y entre ellas, a las prácticas de reutilización de agua residual, mismas que presentan grandes ventajas, como se expone en los siguientes capítulos.

CUADRO I-6

RESUMEN DE DATOS SOBRE EXTRACCION Y CONSUMO DE AGUA EN MEXICO

Región	Disponibilidad Potencial (m ³ x106) 1970	E x t r a c c i ó n				
		(% de la Disponibilidad Potencial)				
		Agrícola	Generación de Energía	Población	Industria	Total
I	288	148	0	13	2.7	164
II	24900	92	35	0.4	0.7	128
III	16250	7	0.3	0.4	1.1	8.9
IV	51250	5.5	70	0.2	0.4	76
V	48770	1.8	0.6	0.1	0	2.7
VI	5800	106	89	4.5	5.8	206
VII	38770	1.1	11	0.3	0.4	13
VIII	56100	0.7	12	0.1	1.2	14
IX	111860	0	7	-	0	7
X	29250	0.1	0	0.1	0	0.2
XI	4220	77	10	1.5	0.7	89
XII	6650	54	87	4.5	1.5	147
XIII	454	527	1.3	228	134	890
Total	394832	11	19	0.6	0.6	31.5

Ref. 5

CUADRO I-6 (Continuación)

RESUMEN DE DATOS SOBRE EXTRACCION Y CONSUMO DE AGUA EN MEXICO

Región	Disponibilidad Potencial (m ³ x10 ⁶)	C o n s u m o				
		(% de la Disponibilidad Potencial)				
		Agrícola	Generación de Energía	Población	Industria	Total
I	288	118	0	5.6	0.3	124
II	24900	74	0.3	0.2	0	75
III	16250	5.6	0	0.2	0.1	6
IV	51250	44	0.7	0.1	0	5.3
V	48770	1.5	0	0.1	0	1.5
VI	5800	88	0.1	1.9	0.5	90
VII	38770	0.9	0	0.1	0	1.1
VIII	56100	0.5	0	0.1	0.1	0.7
IX	111860	0	0	0.1	0	0.1
X	29250	0	0	0.1	0	0.1
XI	4220	63	0.1	0.7	0	64
XII	6650	45	0.1	2.1	0.1	47
XIII	454	422	1.1	92	15	530
Total	394832	9.1	0.1	0.2	0.1	9.6

Ref. 5

CAPITULO II

GENERACION DE AGUA RESIDUAL EN MEXICO

(12)
El Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de Aguas define, en su artículo No. 70, al agua residual como: "... el líquido de composición variada proveniente de usos municipal, industrial, comercial, agrícola, pecuario o de cualquier otra índole, ya sea pública o privada, y que por tal motivo haya sufrido degradación en su calidad original ". Dentro de los usos a que hace referencia éste artículo, destacan en el país los municipales, industriales y agrícola, por los grandes volúmenes de agua manejados, por lo que debe suponerse que éstos mismos sectores constituyan las principales fuentes de emisión de agua residual. Por otro lado, hay una estrecha relación entre la calidad del agua y el uso al que se le destina. Esta calidad determina las actividades en las que se puede hacer uso de ella y muchas veces ése uso la altera al grado de que algunas actividades industriales pueden llegar a introducir sustancias tóxicas.

Los usos doméstico e industrial ocasionan actualmente los más serios --- problemas de contaminación, ya que los usos agrícolas tienen un gran consumo (95% del volumen demandado)⁽⁵⁾, y por lo tanto, el agua retornada en estado líquido es de volumen reducido.

Tomando ésto en cuenta, se consideró conveniente estudiar el volumen y calidad del agua residual derivada en los dos primeros usos mencionados a fin de generar información para evaluar las posibles alternativas para Optimizar el aprovechamiento del recurso hidráulico.

II-1 Volumen y Calidad del Agua Residual Generada

Con objeto de analizar la disponibilidad y calidad de las aguas residuales generadas en el país se toma en cuenta:

Las aportaciones de agua residual doméstica, calculadas a partir de la distribución de localidades por ámbitos de población y dotaciones promedio de agua potable, expuestos en el capítulo I.

Las aportaciones de agua residual industrial, calculadas en función de la producción, de las demandas de agua e índices de descarga, incluyendo además, las predicciones referentes a los años 1980 y 2000 según los planes de expansión y proyección hasta la fecha.

II-1-1 Sector Doméstico

La estimación del volumen de agua residual generado por el sector doméstico en México es relativamente sencilla conociendo los datos sobre dotaciones de agua potable y suponiendo un coeficiente de retorno promedio de 80% ⁽⁷⁾ mismo que fué determinado en función de los volúmenes servidos y los medidos en las descargas de una serie de núcleos poblacionales en el país. Sin embargo dicho coeficiente varía en función del grado de avance de las obras de drenaje y del diseño de éstas, ya que en la gran mayoría de las poblaciones en México, los sistemas de drenaje colectan también los escurrimientos pluviales.

De acuerdo a los datos de la sección I-2, existen en México más de 95000 comunidades rurales con menos de 2500 habitantes que, en total, generan aproximadamente $3 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{día}$ con un gasto medio de aguas residuales por población de 0.1 l/seg. Las comunidades urba-

nas, que en el año de 1970 sumaron más de 1800, con una población total de 19 millones de habitantes, presentan los caudales de agua residual siguientes:

Ambito de Población (hab)	Número de Poblaciones en México	Gasto medio por localidad (l/seg)	Generación Total (m ³ x 10 ⁵ /día)
2500 a 10000	1500	1.6	2.1
10000 a 50000	250	16	3.5
50000 a 100000	30	112	2.9
100000 a 800000	28	414	10.0

Considerando los volúmenes citados, así como los correspondientes a los generados en el Distrito Federal, Guadalajara y Monterrey, que son respectivamente $1.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$, $2.6 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{día}$ y $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{día}$, se obtiene la magnitud de la descarga global de aguas residuales en México, misma que asciende a 3.96 millones de m^3 por día y que equivale al 0.37% del escurrimiento anual. Por otro lado, para la evaluación de los caudales con fines de reuso, deben discriminarse los generados en poblaciones menores de 2500 habitantes, ya que éstas difícilmente cuentan o contarán con sistemas de colección de agua residual. Esto nos conduce a determinar el caudal total de agua residual factible de aprovecharse, mismo que resulta de 3.95 millones de m^3 por día y que representa el 199.7% del consumo anual de aguas en la industria y en la generación de energía. Las estimaciones sobre generación de agua residual en el sector doméstico para el año 2000 son las siguientes ⁽⁷⁾ :

Población total: 135.4×10^6 habitantes

Población total servida con red de drenaje: 80% (108.3×10^6 habitantes)

Población urbana: 81.2×10^6 habitantes (75% de la población con drenaje)

- dotación de agua potable: 325 l/hab-día

- coeficiente de retorno: 80%

Población rural: 27.1×10^6 habitantes (25% de la población con drenaje)

- dotación de agua potable: 250 l/hab-día

- coeficiente de retorno: 80%

Descarga global : 25.5×10^6 m³/día

Aunque puede decirse que dado su origen, las aguas residuales puramente domésticas presentan características similares y son raras las variaciones que se pueden esperar en las descargas de poblaciones diferentes, existe una serie de factores que afecta directamente la concentración de los parámetros contaminantes e incluso, modifican la calidad del agua residual. Dentro de los factores que afectan las características de las aguas residuales domésticas se pueden contar como de primer orden los siguientes⁽¹³⁾:

1.- Condiciones climatológicas de la zona

2.- Nivel económico de la población

3.- Nivel de desarrollo industrial y

4.- Grado de urbanización de la población

La presentación de las características promedio de las aguas residuales domésticas del país, resulta de particular importancia para evaluar la factibilidad de su aprovechamiento con fines de reuso industrial y agrícola, ya que éstas proporcionan un criterio sobre la

necesidad de tratamiento depurativo. En la referencia 13, se incluye un estudio sobre la caracterización de las aguas residuales generadas en 127 poblaciones mexicanas, las cuales se han agrupado por ámbito de población, presentando los resultados en el cuadro II-1.

II-1-2 Sector Industrial

La estimación del volumen y calidad del agua residual generada en el sector industrial presenta serios obstáculos; en primera instancia por la diversidad de ramos productivos y por la diferencia de procesos empleados aún para la elaboración de un mismo producto, pero principalmente por el limitado acceso a la información técnica, debido a ciertos temores por parte del sector industrial mexicano. Esto ha originado que en los estudios sobre usos, demandas y descargas de agua en la industria ⁽¹⁴⁾ se haga uso de coeficientes e índices de consumo y descarga de agua determinados para los sectores industriales de otros países, siendo las estimaciones no exactas, entre otros motivos, por la diferencia en la edad tecnológica del equipo y por la calidad del producto elaborado. Asimismo, la determinación de la calidad del agua residual industrial es sumamente compleja, especialmente en empresas donde son elaborados, simultánea o periódicamente diferentes productos, como ocurre con la industria química.

En estas condiciones, la calidad del agua residual de los sectores incluidos en el estudio, es estimada, de una forma global, a través de las masas de contaminantes generados y detectados como contaminantes orgánicos (DBO) y sólidos en suspen-

CUADRO II-1 (Hoja 1 de 2)

CARACTERISTICAS PROMEDIO DE AGUAS RESIDUALES POR AMBITO DE POBLACION EN LA REPUBLICA MEXICANA

	2 500 a 10 000 Habitantes			10 000 a 20 000 Habitantes			20 000 a 50 000 Habitantes			50 000 a 100 000 Habitantes		
	\bar{x}	S	CV	\bar{x}	S	CV	\bar{x}	S	CV	\bar{x}	S	CV
pH	7.43	0.47	6.3	6.90	0.43	6.2	6.94	0.55	7.9	7.26	0.24	3.3
Temperatura °C	24.74	19.70	39	20.10	9.10	45	23.35	9.55	41	22.40	13.50	60
DBO (mg/l)	264.20	127.10	48	299	215	72	254	158	62	301	333	111
DQO (mg/l)	698.20	1436	206	719	407	57	609	563	92	430	262	61
Sólidos Sedimentables (ml/l)	9	14.70	163	4.61	5.02	110	7.90	14.31	18.1	2.81	0.89	32
Grasas y Aceites (mg/l)	55.70	42.40	76	44.30	28.70	65	65.20	52	80	96	146	170
N _a -amoniacal (mg/l)	26.60	16.40	62	28	18	64	14.40	12.10	84	11.70	11.30	97
N _a -orgánico (mg/l)	17.80	13	74	22.80	20	88	22.60	27.50	122	9.20	5.80	63
N _a -total (mg/l)	36.70	22.80	62	44.30	30.30	68	30	26	87	24.50	18	73
PO ₄ -total (mg/l)	19.50	17	87	24.50	18.70	76	16	14	88	29	42	145
S. A. A. M. (mg/l)	13.50	9	67	11.40	9	79	17	6	35	17.10	10	58
Coliformes Totales (NMP x 100 ml) x 10 ⁷	6.80	9.10	135	7.73	58	8	13.50	5.90	44	107	131.70	123
Sólidos Totales (mg/l)	1552	1676	108	1141	276	24	1391	683	49	932	365	39
Sólidos Totales Suspendidos (mg/l)	286	158	55	309	157	51	233	324	139	167	87	52
Sólidos Totales Disueltos (mg/l)	1213	1658	137	830	309	37	1032	603	58	820	376	46
Sólidos Totales Volátiles (mg/l)	737	290	39	571	200	35	449	142	32	349	94	27
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/l)	184	106	58	202	137	68	246	132	54	109	45	60
Sólidos Disueltos Volátiles (mg/l)	514	1040	202	379	134	35	298	199	67	210	67	32
Sólidos Fijos Totales (mg/l)	851	807	95	565	309	55	770	561	73	602	342	57
Sólidos Fijos Suspendidos (mg/l)	106	81	76	110	65	59	98	107	109	69	53	77
Sólidos Fijos Disueltos (mg/l)	699	960	137	425	317	75	759	657	86	624	327	52

Simbología:

x : Media

S : Desviación Estándar.

$cv = \frac{S}{\bar{x}} \times 100$: coeficiente de variación.

Ref. : 13

CARACTERISTICAS PROMEDIO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES
EN LA REPUBLICA MEXICANA

p H (unidades)	7.2		
DBO (mg/l)	274		
DQO (mg/l)	655		
Sólidos Sedimentables (ml/l)	7		
Grasas y Aceites (mg/l)	60		
Nitrógeno Total (mg/l)	42		
Fosfatos totales (mg/l)	21		
Detergentes (mg/l)	14		
Coliformes (NMP/100 ml)	16 x 10 ⁸		
Sólidos (mg/l) :	Suspendidos	Disueltos	Suma
Volátiles	160	440	600
Fijos	100	670	770
Suma	260	1 110	1 370

sión (SST), mencionándose, en su oportunidad, los contaminantes que usualmente se encuentran en los distintos efluentes.

Para el análisis de las descargas del sector industrial se han tomado las cinco principales ramas consumidoras de agua de primer uso, mismas que a continuación se estudian:

a.- Industria Azucarera

La industria azucarera nacional produjo en el año de 1973 alrededor de 2.6 millones de toneladas de azúcar cristalina (Cuadro II-2)⁽¹⁵⁾, segregando de sus líneas de proceso unos 620 millones de m³ de agua residual en base a un índice promedio de descarga de 239.29 m³/ton⁽¹⁶⁾

. Las características que causan problemas en estos efluentes son básicamente los sólidos suspendidos, el pH que es marcadamente ácido y la DBO que también es causa de trastornos en los cuerpos receptores naturales. El crecimiento de la industria azucarera nacional ha mostrado un ritmo constante en los últimos veinte años⁽¹⁸⁾, no obstante, es de esperarse que las tendencias de crecimiento se vean modificadas próximamente pues cada vez es más difícil abrir nuevos terrenos en zonas climatológicas adecuadas al cultivo de la caña de azúcar. Se estima que en los años de 1980 y 2000, los volúmenes de agua residual generados en este sector ascenderán a 932 y 2718 millones de m³ por año⁽¹⁶⁾.

b.- Industria de la Celulosa y el Papel

En el año de 1973, la producción nacional de celulosa ascendió a 483 miles de toneladas y la de papel a 981 mil toneladas⁽¹⁵⁾, distribuidas en el país como se muestra en el Cuadro II-3. Los índices de

CUADRO II-2

GENERACION DE AGUA RESIDUAL A NIVEL NACIONAL EN LA
PRODUCCION DE AZUCAR. AÑO 1973

E s t a d o	Producción (toneladas)	% de la Producción	Demanda de Agua (M m ³ /ton) (1)	Descargas (m ³ x10 ⁶ /año) (2)
Campeche	21 319	0.83	6.27	5.1
Colima	46 568	1.82	13.70	11.1
Chiapas	23 127	0.90	6.80	5.5
Guerrero	2 844	0.10	0.84	0.68
Jalisco	304 492	11.88	89.57	72.9
Michoacán	98 397	3.84	28.94	23.5
Morelos	164 963	6.43	48.53	39.5
Nayarit	75 208	2.93	22.12	18.0
Oaxaca	129 309	5.04	38.04	30.9
Puebla	73 638	2.87	21.66	17.6
San Luis Potosí	94 638	3.69	27.84	22.6
Sinaloa	234 603	9.15	69.01	56.1
Tabasco	78 031	3.04	22.95	18.7
Tamaulipas	203 124	7.92	59.75	48.6
Veracruz	1 036 697	40.43	304.95	248.1
T o t a l	2 588 985	100.00	761.95	619.5

Notas: 1).- Coeficiente de demanda: 294.16 m³/ton de azúcar

2).- Coeficiente de descarga: 239.29 m³/ton de azúcar

Ref.: 16

demanda de agua en esta industria son de $36.5 \text{ m}^3/\text{ton}$ de papel y de $160 \text{ m}^3/\text{ton}$ de celulosa⁽¹⁷⁾. Las descargas del sector de la celulosa y el papel son considerables, tanto en volúmen como por los problemas que causan en los cuerpos receptores naturales, las elevadas concentraciones de sólidos suspendidos y sedimentables, la DBO y el color. Las demandas y consumos unitarios de agua son elevados pues no se han generalizado las prácticas de recirculación del agua de proceso, que requerirían de un tratamiento previo; la recirculación es practicada únicamente cuando los dispositivos para tal efecto están integrados de origen, en el equipo de producción.

Los volúmenes de agua residual descargados por las plantas de celulosa y papel, considerando índices promedio de 130 y $31.5 \text{ m}^3/\text{ton}$ de producto respectivamente, son de 62.8 y 30.9 millones de m^3 (1973), distribuidos en los estados enlistados en el cuadro II-3.⁽¹⁷⁾ Los volúmenes de agua residual en el futuro serán muy elevados, alcanzando las cifras de 63 y 107 millones de m^3 en el año de 1980 y de 322 y 414 millones de m^3 en el año 2000 respectivamente para la industria del papel y la celulosa⁽¹⁷⁾, por lo que es urgente elaborar planes efectivos de manejo racional del agua y tratar de abatir los índices de descarga a la par que construir las plantas de tratamiento para los efluentes industriales, a fin de promover el reuso interno de estos caudales.

c. - Industria del Hierro y Acero

La industria siderúrgica nacional elaboró 4.7 millones de toneladas de acero en 1973⁽¹⁵⁾, distribuidas en los centros de población mos-

CUADRO II-3

DISTRIBUCION DE LA PRODUCCION Y DESCARGA DE AGUA RESIDUAL
DE LA INDUSTRIA DE LA CELULOSA Y PAPEL (1973)

E s t a d o	Producción de Celulosa		Descarga de Agua (m ³ x10 ⁶ /año)	Producción de Papel		Descarga de Agua (m ³ x10 ⁶ /año)
	Toneladas	%		Toneladas	%	
Estado de México	187 597	38.8	30.0	458 853	46.8	16.7
Distrito Federal	34 134	7.1	5.5	176 500	18.0	6.4
Jalisco	57 325	11.9	9.2	58 000	5.9	2.0
Veracruz	37 948	7.9	6.1	64 872	6.6	2.4
Nuevo León	9 126	1.0	1.5	118 599	12.1	4.3
Chihuahua	101 189	20.9	26.2	13 315	1.4	0.5
Puebla	-	-	-	17 931	1.8	0.7
Tlaxcala	1 959	0.4	0.3	4 151	0.4	0.2
Guerrero	5 700	1.2	0.9	5 431	0.6	0.2
Oaxaca	38 268	7.9	6.1	51 000	5.2	1.9
Morelos	-	-	-	10 263	1.0	0.4
Tamaulipas	6 908	1.4	1.1	-	-	-
Guanajuato	3 000	0.6	0.5	-	-	-
San Luis Potosí	-	-	-	2 152	0.2	0.1
	483 163	100.0	77.3	981 127	100.0	35.8

Notas:

(1) En función de un Índice de Descarga de 160 m³/ton.

(2) En función de un Índice de Descarga de 36.5 m³/ton

Ref.: 17

trados en el cuadro II-4. Las industrias integradas aportaron el 88% de la producción ⁽¹⁸⁾ y en su mayoría están situadas en las zonas semidesérticas del norte del país; las plantas semi-integradas son de poca capacidad pero muy numerosas, mostrando una mayor concentración en el Valle de México, cerca de los grandes mercados. La fabricación de hierro y acero es una de las ramas industriales que demanda mayor cantidad de agua, no obstante, el consumo unitario en m³/ton y los coeficientes de recirculación, son comparables a los de las diez plantas más eficientes en EUA ⁽¹⁹⁾, excepto para el caso de la empresa Tubos de Acero de México, situada en la costa de Veracruz y en una zona de grandes reservas acuíferas, donde sus índices de consumo son de 3 a 5 veces mayores que los de las plantas antes mencionadas. Por otro lado, la ubicación del complejo SICARTSA brindará la oportunidad de abastecimientos abundantes de agua para los procesos siderúrgicos y es de esperarse que sus índices de consumo sean altos.

Las descargas del sector siderúrgico nacional son considerables tanto en volúmen como en concentración de contaminantes, no existiendo a la fecha ninguna empresa con dispositivos de tratamiento completo para acondicionar la calidad de sus efluentes, antes de la disposición en los cuerpos receptores, a pesar de que éstos muestran grandes concentraciones de sólidos suspendidos, cianuros, fenoles, amoníaco, y fluoruros, entre otros.

d. - Industria Textil

La industria textil puede ser clasificada en tres tipos, dependiendo

CUADRO II-4

DEMANDA, CONSUMO Y DESCARGAS DE AGUA EN LA INDUSTRIA

DEL HIERRO Y EL ACERO

P r o d u c t o r	Producción de Acero (1973)		Demanda de Agua (m ³ x10 ⁶ /año)	Consumo Unitario (m ³ /ton acero)	Descarga de Agua Residual (m ³ x10 ⁶ /año)	Indice de Descarga (m ³ /ton)
	(Tonx10 ⁶)	%				
AHMSA (Monclova, Coah.)	1.92	40.3	15.90	8.28	3.30	1.72
Fundidora Monterrey (Monterrey, N.L.)	0.86	18.1	8.18	9.51	2.08	2.42
Hojalata y Lámina, S.A. (Monterrey, N.L.)	0.69	14.4	7.20	10.43	2.44	3.54
Industrias Semi-Integradas	0.59	12.3	11.80	20.00	7.74	13.11
TAMSA (Veracruz, Ver.)	0.38	8.1	21.39	56.30	18.66	49.41
HyLSA de México (Puebla, Pue.)	0.32	6.8	6.40	20.00	4.20	13.11
T o t a l	4.76	100	70.87	Promedio 14.87	38.42	Promedio 8.08

de la materia prima que procese, siendo distinguibles en México la industria del algodón, de la lana y de las fibras sintéticas. En conjunto, constituyen una de las más importantes actividades económicas del país y su capacidad instalada de 3073016 husos y 78225 telares ⁽¹⁵⁾

no sólo satisface las demandas internas, sino que produce excedentes destinados a los mercados internacionales.

Estas industrias modifican constantemente sus características internas, pues la adopción de nuevos procesos técnicos, equipos y agentes químicos, es necesaria en función a la demanda de nuevos tipos de telas y colores para los mercados consumidores. Esto resulta en una mayor diversificación de la industria. En el año de 1972, la industria textil produjo en total 261000 toneladas de hilados y tejidos de fibras blandas ⁽¹⁵⁾, con la distribución mostrada en el cuadro II-5. El mayor porcentaje corresponde a la industria del algodón, siguiéndole las fibras sintéticas y en una menor proporción la lana. Aproximadamente el 90% de la producción se consumió en el país y el resto se exportó. La industria textil en general, demanda grandes cantidades de agua, destinadas primordialmente a operaciones de lavado y enjuague de las fibras, ubicándose la demanda principalmente en el centro de la república, concretamente en los estados de Puebla, México, Tlaxcala y el Distrito Federal, en donde se encuentran más de las dos terceras partes de los establecimientos del ramo. La mayoría de los establecimientos manufactureros son de pequeña capacidad y en muchos casos son a nivel artesanal (familiar), lo que dificulta considerablemente la estimación de los índices promedio de demanda y

CUADRO II-5

PRODUCCION Y DESCARGA DE AGUA RESIDUAL EN LA
INDUSTRIA TEXTIL MEXICANA

Hilados y Tejidos de Fibras Blandas	Producción (1972) (Ton) (1)	Índice de Descarga (m ³ /Ton) (2)	Volumen de Agua Residual (m ³ x10 ⁶ /año)
Algodón	155 070	142	22.2
Lana	9 315	235	2.19
Fibras Sintéticas	96 633	94	9.08
Total	261 018	Promedio 157	33.47

Notas.: 1) Ref.: 15
2) Ref.: 19

descarga de agua. A falta de información disponible, en el presente estudio fueron estimados los volúmenes de demanda y descarga de agua en función del empleo de índices promedio calculados para grandes plantas automatizadas de países desarrollados ⁽¹⁹⁾, por lo que las cifras consignadas deberán tomarse con las debidas reservas. En estas condiciones, la descarga de agua residual total en los centros textiles nacionales fué estimada en 33.5 millones de m³ (1972), siendo los principales contaminantes encontrados en estos efluentes, los derivados de las impurezas naturales de las fibras, como polvos, grasas, materia vegetal, etc. y productos químicos utilizados en los procesos de acabado, como detergentes, tintes, aceites, lubricantes, gomas, colas y resinas, además de un alto contenido de grasa animal (lanolina), en los efluentes de la industria lanera.

e.- Industria Química

La industria química es, tal vez, la rama más compleja del sector industrial nacional. Puede ser dividida en dos grandes ramas: (1) inorgánica y (2) orgánica.

Dada la gran diversificación de procesos y productos orgánicos, poco se sabe del manejo del agua en los mismos, por lo que la estimación de los volúmenes de agua residual presentados en este estudio incluyen principalmente a los generados en la industria química inorgánica básica, es decir, los emitidos en la producción de ácidos, bases y sales inorgánicas.

En 1973 la producción total de ácidos inorgánicos en México ascendió

a más de 2.47 millones de toneladas⁽²⁰⁾, correspondiendo el 72% de ésta, a la producción de ácido sulfúrico, el 17% a la de fosfórico, el 7% a la de nítrico y el resto a otros ácidos como, clorhídrico, fluorhídrico y crómico principalmente. La producción de sosa cáustica fué de 188337 toneladas, siendo casi despreciables los volúmenes de otras bases producidas en este lapso. En el aspecto de sales inorgánicas, la producción de bicarbonato de sodio alcanzó las 7185 toneladas y la de carbonato de sodio 374600 toneladas, siendo éstas sales las de más significancia, entre las elaboradas en México, en lo referente a consumos y generación de agua. En función de la producción e índices de descarga en cada proceso específico⁽¹⁹⁾, así como de diversas fuentes⁽²⁰⁾, fué calculado el volumen de agua residual generado en éste sector industrial. Cuadro II-6.

La industria química en general (inorgánica y orgánica) emite contaminantes de una gran diversidad, tanto en concentraciones como en toxicidad, siendo su remoción muy dificultosa, técnica y económicamente⁽²⁰⁾. Los parámetros que requieren mayor control en éstos efluentes son el pH, temperatura, la excesiva concentración de sólidos suspendidos; disolventes, sustancias tóxicas como cianuro y plaguicidas; resinas y metales pesados.

II-2 Efectos de la Disposición Libre del Agua Residual en los Cuerpos Receptores

En general, el concepto agua residual está asociado con una serie de efectos adversos causados por las sustancias arrastradas durante su utilización en múltiples usos; entre los efectos adversos son de men-

CUADRO II-6

CARACTERISTICAS PROMEDIO DEL AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA QUIMICA

Concepto	R a m a s P r o d u c t i v a s									
	Química Inorgánica Básica			Hulera y Resinas		Industria Farmacéutica		Industria de Plaguicidas		
	Acidos	Bases	Sales	Resinas	Hule Sintético	Maerias Primas	Produc- toster- minados	Insec- ticidas	Herbi- cidas	Fungi- cidas
Demanda (m ³ /ton)	13.2	18.9	17.3	18.4	14.3	0.9	4.4	59.9	79.2	108.4
Descarga (m ³ /ton)	11.8	11.7	10.2	10.1	13.7	0.7	3.5	21.1	49.8	64.0
pH (unidades)	3.1	9.5	7.4	7.9	7.9	7.9	7.3	7.1	6.4	-
Temp. (° C)	31.2	31.2	26.5	30.3	22.3	25.4	27.2	27.2	25.5	-
Grasas y Aceites(mg/l)	34.6	0.3	0.2	167	167	7.7	90.2	16.5	23.8	-
S. Se (ml/l)	4.0	57.7	0.7	12.9	13	6.2	6.3	8.5	8.7	-
ST (mg/l)	19748	9404	176652	3592	3592	505	1334	6084	9211	-
STV (mg/l)	3088	311	54	752	752	189	747	4537	8241	-
SDT (mg/l)	1344	3191	373	896	896	271	125	374	721	-
SDV (mg/l)	95	31	28	222	222	100	81	239	502	-
DBO (mg/l)	11	41	50	428	428	279	701	208	332	-
DQO (mg/l)	226	1972	1427	1615	1615	527	1247	191	316	-
N-Total (mg/l)	144	4	100	36	36	4	22	88	181	-
PO ₄ ^E -Total (mg/l)	473	7	0.4	23	23	2	76	27	21	-

Notas: Los promedios han sido ponderados de acuerdo al gasto de cada descarga analizada.

Referencia: 20

cionarse:

- 1) la creación de condiciones insalubres en los cuerpos receptores con los consecuentes efectos en la salud de la población.
- 2) severas restricciones en el uso potencial de las aguas de dichos cuerpos para fines municipales e industriales por la degradación de la calidad del agua.
- 3) drásticas disminuciones en la producción pesquera por la contaminación de las aguas superficiales por materiales tóxicos y organismos patógenos.
- 4) eutricación de las aguas y rompimiento de los balances ecológicos.

Los efectos citados tienen su origen, fundamentalmente por la inadecuada disposición en aguas superficiales, de efluentes, que aunque, en algunos casos -- pequeños en volumen, son portadores de grandes concentraciones de contaminantes que degradan por completo la calidad del agua de las escasas fuentes de abastecimiento.

Esta inadecuada disposición de efluentes contaminados se deriva de una política industrial despistada, ignorante de los costes ecológicos y de los efectos indirectos que dicha práctica provoca al disminuir los volúmenes de agua de primera calidad disponibles y condicionar las demandas industriales a los excedentes de los usos domésticos que son prioritarios. En tales condiciones para la satisfacción de la demanda industrial deberá recurrirse a la costosa importación de agua de otras regiones o a la migración industrial hacia zonas donde existan abundantes reservas hidráulicas, con el consecuente incremento en los

costos de operación por la lejanía de los centros de abastecimiento de materia prima y mercados.

De acuerdo a los datos adjuntados en las secciones II-1-1 y II-1-2, el caudal de agua residual doméstica asciende actualmente a 3,9 millones de m^3 por día, con una aportación estimada de contaminantes de 1 073 ton de DBO por día y -- 5 050 ton de sólidos totales*; para el año 2 000, y de acuerdo con las metas oficiales de ampliación de los servicios alcantarillados, el caudal de aguas residuales aumentarán a 25.4 millones de m^3 por día.

La industria extractiva demanda y descarga caudales muy grandes de agua y los principales problemas de contaminación que causa son debidos al arrastre de sólidos en suspensión y, en el caso de minas a cielo abierto, posible contaminación por metales pesados. La industria de transformación descarga en sus agua residuales considerables masas de contaminantes orgánicos e inorgánicos; en términos de caudal el sector industrial que mayores problemas ocasiona es el de la industria azucarera que en el año de 1973 descargó cerca de 2 millones de m^3 por día. Para el año 2 000 las descargas de aguas residuales de los principales sectores de la industria de transformación se estiman en las siguientes cifras (en $m^3 \times 10^6$ por día) : azúcar 7.45; petróleo-1.12; celulosa y papel-2.05 ; hierro y acero (exclusivamente la industria integrada)-1.02 ; industria textil-0.71 e industria química inorgánica-4.90 .

* Basados en una aportación de 54 g de DBO/hab-día y 245 g de ST/hab por día.

Ref:13

Lo anterior se presenta con parámetros que como la DBO y ST, pueden ser - comparables entre uno y otro sector, sin embargo, si se consideran otros conceptos como disolventes, metales pesados, colorantes y tóxicos, la contaminación de origen industrial representa el principal problema que el país tiene - que controlar.

Una de las consecuencias sobresalientes de la contaminación, que es necesario mencionar, es la posible influencia en el aumento de defunciones de origen hídrico en el país, como un porcentaje de las defunciones totales, el cual ha pasado de 2.1 % en 1963 a 14.02 en 1971,⁽³⁾ lo cual es alarmante como estadística nacional y más aún si se le compara con los niveles de mortandad por este origen -- que presentan otros países más desarrollados que México.

Las cuencas de primer orden en cuanto a contaminación son:⁽³⁾

Cuenca	Carga Orgánica Ton DBO/año	Principales Fuentes de Contaminación
Río Pánuco	334 724	Población, industria química, alimentos y bebidas.
Río Lerma	134 172	Población, industria química, industria azucarera.
Río Balsas	92 158	Industria azucarera, población.
Río San Juan	60 178	Industria química, población.
Río Guayalejo	60 426	Industria azucarera.
Río Blanco	60 472	Industria azucarera.

Cuenca	Carga Orgánica Ton DBO/año	Principales Fuentes de Contaminación
Río Culiacán	48 683	Industria azucarera.
Río Nazas	16 074	Alimentos y bebidas, población e industria química.
Río Fuerte	48 164	Industria azucarera.
Río Coahuayana	26 324	Industria azucarera.
Río Conchos	11 911	Población, petróleo y petroquímica.

Las principales fuentes de contaminación a nivel nacional son:⁽³⁾

Acabados de metales	Tóxicos, pH
Industria textil	Materia orgánica, colorantes
Industria petrolera	Materia orgánica, tóxicos, grasas y aceites
Productos químicos	Tóxicos, colorantes, pH
Papel y celulosa	Materia orgánica, sólidos
Industria azucarera	Materia orgánica, sólidos, temperatura
Cervecerías	Materia orgánica, nutrientes, sólidos
Vitivinícola	Materia orgánica, nutrientes
Fábrica de refrescos	Materia orgánica
Productos lácteos	Materia orgánica, nutrientes
Industria alimenticia	Materia orgánica, sólidos
Productos de hule	Tóxicos, sólidos
Fertilizantes	Tóxicos, sólidos, nutrientes, pH

Curtiduría	Tóxicos, materia orgánica, sólidos, pH
------------	--

Las localidades prioritarias en cuanto a generación de contaminantes son las siguientes: ⁽³⁾

Localidad	Ton de DBO/año	Fuentes Principales
Distrito Federal	310 533	47% población; 24% productos químicos.
Cosamaloapan	82 068	99% azúcar.
Los Mochis	47 813	96% azúcar.
Monterrey	47 053	44% prod. químicos; 32% población.
Zacatepec	43 821	99% azúcar.
Córdoba	43 769	95% azúcar.
Coatzacoalcos	34 543	60% petróleo; 33% prod. químicos.
Cd. Mante	33 110	98% azúcar
Guadalajara	29 431	72% población; 12% prod. químicos.
Xicotencatl	27 315	99% azúcar.
Tamazula	23 715	99% azúcar.
Chietla	19 213	99% azúcar.
Tepic	13 494	94% azúcar.
Costa Rica	18 256	99% azúcar.
Navolato	17 716	99% azúcar.

Localidad	Ton de DBO/año	Fuentes Principales
Orizaba	15 650	77% azúcar; 9% bebidas alcohólicas, 8% población.
Poncitlán	14 683	99% prod. químicos.
Casarano	13 011	99% azúcar.
Salamanca	11 595	55% petróleo; 36% prod. químicos.
Zacapu	10 895	99% prod. químicos.
Toluca	10 870	77% prod. químicos, 18% población.
Cd. Valles	10 587	86% azúcar, 8% bebidas alcohólicas.
Tampico	10 854	52% petróleo; 36% población.
El Dorado	10 158	99% azúcar.

Las 24 localidades mencionadas anteriormente generan más de diez mil toneladas de DBO por año cada una. De las fuentes de contaminación principales, sistemáticamente el sector industrial es el que contribuye mayormente a la contaminación, ocupando un lugar secundario la población; las excepciones las constituyen el Distrito Federal con un 47% de la carga orgánica atribuible a sus habitantes, Monterrey con un 32% y Guadalajara con un 72%, siendo esta última ciudad la única que presenta la mayor proporción de su contaminación como de origen doméstico.

II-3 El Agua Residual como Recurso Hidráulico.

El análisis de la información sobre disponibilidad, demandas, usos y consumos de aguas de primer uso, conduce a la detección de los siguientes problemas:

- a) suministro deficitario de aguas de primer uso en las regiones Centro Valle de México, principalmente y en las regiones Bravo, Cuencas Cerradas del Norte y Baja California.
- b) a pesar de que, en conjunto el sector industrial es el principal agente de la contaminación del agua en el país, en las regiones arriba citadas, particularmente el sector doméstico representa la principal fuente de contaminación de aguas superficiales, siendo el volumen descargado suficiente para satisfacer las demandas de agua teóricas del sector industrial, si su calidad lo permitiese.
- c) los problemas de contaminación de aguas, por la disposición en ellas de efluentes industriales, ha sido debidamente estudiado por el sector público, determinando la instalación de dispositivos de tratamiento para regular la calidad del agua descargada en industrias contaminantes, recomendando el fomento de las técnicas de utilización del agua óptimamente mediante recirculación o reuso interno cuando fuese factible. Dichas medidas ayudarán sin duda al control de los problemas de contaminación de origen industrial, sin embargo, quedan latentes los problemas de contaminación de origen doméstico, la disponibilidad hidráulica deficitaria para usos domésticos y principalmente agrícolas.

La detección de los problemas mencionados, ha sido visualizada como una premisa sólida para proponer al agua residual como recurso hidráulico, de cantidad suficiente para su aprovechamiento integral en la industria y en la agricultura, siempre y cuando su calidad haga factible este aprovechamiento. Es obvio que la industria en general, requiera de aguas de buena calidad en ciertos usos, por lo que deben ser estudiados estos aspectos básicos dentro de la determinación de la factibilidad técnica del reuso. En la agricultura, las normas de calidad de agua para riego son mas flexibles, teniéndose noción del agua residual en riego desde tiempos históricos; las nuevas técnicas industriales e infinidad de factores socio-económicos, productivos y culturales han conducido a cambiar radicalmente los efectos de la aplicación de agua residual en riego, por lo que dichos aspectos deben ser visualizados a fin de fundamentar técnicamente el reuso de tales aguas.

CAPITULO III

FACTIBILIDAD TECNICA DEL REUSO DE AGUAS RESIDUALES

La conciencia del reuso de aguas residuales como medida para la optimización de los recursos hidráulicos, ha existido por mucho tiempo; sin embargo, dicha alternativa ha cobrado interés a raíz de los crecientes problemas inherentes al desarrollo urbano industrial de los últimos años, que se han traducido en un rápido incremento en el consumo y agotamiento de los recursos naturales, convirtiendo al recurso en una mercancía de valor, el cual debe ser administrado cuidadosamente.

Los obstáculos que anteriormente presentaba la adopción de esta alternativa eran de origen técnico y económico principalmente. Los problemas técnicos pronto dejaron de presentar serias barreras, pero las ventajas económicas, sólo han venido vislumbrándose recientemente y principalmente en los grandes núcleos urbanos.

El área metropolitana de la ciudad de México recibe actualmente cerca de $43 \text{ m}^3/\text{seg}$ de agua para la satisfacción de sus necesidades, de los cuales aproximadamente $23 \text{ m}^3/\text{seg}$ son empleados en usos domésticos y la mayor parte del remanente es empleado por la industria.⁽⁸⁾

Las inversiones requeridas para traer más agua a la ciudad de México se estiman en 150 millones de pesos por cada m^3/seg aprovechando las fuentes de abastecimiento cercanas, cifra que se estima puede elevarse hasta 350 millones de pesos por cada m^3/seg en la década de 1980 cuando será necesario traer el agua de fuentes más lejanas co-

mo pueden ser del alto Río Balsas y del alto río Tecolutla; estas inversiones incluyen únicamente las obras de captación y conducción de las aguas y no incluyen las obras de potabilización, regularización de caudales ni sistemas de distribución. Los costos unitarios del agua, por los conceptos arriba citados y por amortización de las inversiones pueden ser estimadas para distintas tasas de interés y vida útil de las obras como a continuación se indica:

a. - Costo unitario ($\$/m^3$) para una inversión de 150 millones de pesos por m^3 /seg:

Vida Util (años)	Tasa de Interés (% anual)		
	15	12	10
15	0.81	0.70	0.62
20	0.76	0.64	0.56
30	0.72	0.59	0.50

b. - Costo unitario ($\$/m^3$) para una inversión de 350 millones de pesos por m^3 /seg:

Vida Util (años)	Tasa de Interés (% anual)		
	15	12	10
15	1.90	1.63	1.45
20	1.78	1.49	1.30
30	1.69	1.38	1.18

A los costos unitarios anteriores habría que sumar los costos de bombeo, que pueden ser estimados en forma gruesa suponiendo una necesidad de bombeo de 1000 m y un costo de energía de \$ 0.40/kw-h, lo que representa un costo unitario adicional de $\$ 1.09/m^3$ ⁽⁸⁾. Independen-

dientemente de otros costos de mantenimiento y operación del sistema, el satisfacer nuevas demandas de agua del área metropolitana de la ciudad de México con las fuentes actuales de abastecimiento va a costar por encima de \$ 1.59 a 1.90 por metro cúbico y con las nuevas fuentes de abastecimiento los costos serán en exceso de \$ 2.27 a \$ 2.99 por metro cúbico. Una vez en el área de la ciudad de México las aguas deben ser potabilizadas, reguladas en su flujo, bombeadas y distribuidas a los usuarios lo que incrementa su costo casi en un cien por ciento más; las aguas residuales municipales en cambio, se localizan generalmente justo donde las industrias las necesitan, requieren un mínimo de obras de distribución y abastecimiento y su calidad puede ajustarse por tratamiento a las especificaciones requeridas; a precios actuales (1974), el tratamiento secundario de aguas domésticas es del orden de \$ 1.50/m³.

El análisis somero revela en forma concluyente la urgente necesidad de adoptar, como parte integral de la política hidráulica mexicana, el fomentar y promover en forma decidida el reuso de las aguas residuales en el área metropolitana de la ciudad de México; en mayor o menor grado, la misma necesidad se siente ya en los principales núcleos urbanos e industriales del país y la necesidad será cada día mayor.

III-1 Reutilización del Agua Residual en la Industria

III-1-1 Generalidades sobre la Calidad del Agua en la Industria

El agua utilizada en la industria debe de cumplir ciertos requisitos

de calidad ya que de otra forma es causa de problemas o fallas en las instalaciones tales como las siguientes: (1) tratándose de contaminantes orgánicos en estado sólido o disuelto: fallas en los intercambiadores de calor, corrosión, espumas en calderas y torres de enfriamiento, envenenamiento de catalizadores, destrucción de resinas de intercambio iónico y contaminación de la producción; los contaminantes orgánicos también contribuyen al crecimiento biológico en las torres de enfriamiento y por lo tanto no sólo incrementan los problemas por fallas sino también deterioran el material de las torres de madera; (2) los contaminantes inorgánicos, usualmente en estado disuelto son costosos de remover; los cloruros contribuyen a la corrosión de los metales; el calcio, magnesio y fósforo causan formación de escamas en las calderas e intercambiadores de calor; los carbonatos aceleran la delignificación de la madera en las torres de enfriamiento y los nutrientes, fosfatos y nitratos, contribuyen a la formación de lama en las torres de enfriamiento. (21)

Los indicadores de calidad más importantes son: composición de materia en suspensión, sólidos, alcalinidad total y sus componentes, facilidad para oxidarse, pH, composición de los gases disueltos en el agua, estado microbiológico del agua y grado de dureza y sus componentes, pudiendo considerarse este último como el más importante, Un agua dura interfiere en el teñido de las telas, en la elaboración de la cerveza y en la calidad de los productos en las empacadoras. El sulfato de magnesio es una sal característica de las aguas duras; el

ión cloruro es poco deseable ya que aumenta la conductividad de los papeles aislantes de electricidad; el hierro causa manchas sobre las telas y el papel. La mayoría de las aguas duras, causan incrustaciones en las tuberías de las calderas elevando el costo de operación. (22)

Los requerimientos para reuso del agua varían ampliamente; algunas veces la DBO es el parámetro de importancia, pero a menudo otras características son más importantes. Por ejemplo, un agua que contiene sólidos gruesos o que tiende a desarrollar lama será indeseable en la mayoría de sistemas de enfriamiento; color, dureza, la concentración de minerales específicos e iones, temperatura, pH, salinidad y turbiedad pueden ser características determinantes para un uso particular. (21)

La mayoría de las sustancias orgánicas solubles no son objetables, pero las que forman espuma, causan problemas en torres de enfriamiento y calentadores. Las industrias requieren de agua que permita buen intercambio de calor con superficies metálicas y que causen mínima corrosión. Para el control de escamas, el calcio y el fosfato deben ser reducidos a valores bajos y evitar precipitados de carbonato de calcio y fosfato de calcio. El uso de compuestos para cortar la espuma ha dado control práctico de espumas en torres de enfriamiento y calentadores. Con el advenimiento de componentes de cadena corta en detergentes, que se oxidan más fácilmente en las plantas de tratamiento de aguas residuales, este problema puede desaparecer. Agencias de los EE.UU. ⁽²³⁾ utilizan la conductividad eléctrica como un

indicador de los sólidos disueltos; agua extremadamente pura y por tanto baja en conductividad eléctrica se requiere en los reactores nucleares, así como para algunos procesos como la manufactura de televisiones y en acabado de acero al estaño. La Comisión Sanitaria (23) del Río Ohio (EUA) ha propuesto requerimientos para el suministro industrial de agua especificando que los sólidos disueltos no deben exceder de 750 mg/l en valor medio mensual, o de 1000 mg/l en ningún momento. Para el agua del Río Ohio, valores de conductividad específica de 1200 y 1600 mhos/cm a 25°C, pueden ser consideradas equivalentes a concentraciones de sólidos disueltos de 750 a 1000 mg/l. Ocasionalmente el agua a ser usada en un proceso industrial debe ajustarse a una estrecha variación de valores de pH. En la manufactura (24) del rayón se reporta que el pH deberá estar entre 7.8 a 8.3; algunas veces a un valor mínimo como por ejemplo la fabricación de dulces duros, donde el pH no debe ser menor que 7 a fin de evitar la inversión de la sacarosa y convertirse en productos pegajosos. La experiencia indica que la concentración de fosfatos generalmente debe mantenerse abajo de 40-100 mg/l para prevenir la formación de escamas.

III-1-2 Calidad del Agua en Función del Uso

En la República Mexicana, los principales usos del agua en la industria son: para enfriamiento, para calderas y en proceso. Cada uno de estos usos requiere de una calidad de agua específica como se describe a continuación:

a.- Agua de enfriamiento. Cuadro III-1

La industria en general emplea grandes cantidades de agua para enfriamiento en muy diversos procesos; entre los principales usos se pueden mencionar los siguientes: (1) enfriamiento de condensadores en plantas generadoras de energía, refinerías de petróleo, plantas químicas, destilerías, etc., (2) enfriamiento de máquinas de combustión interna de diesel, gasolina, etc., y en plantas de bombeo (3) enfriamiento de hornos en plantas de fundición, etc. Los principales problemas que se pueden presentar en un sistema de enfriamiento debido a la mala calidad del agua empleada son los siguientes: (1) formaciones de depósitos, principalmente de carbonato de calcio y en casos excepcionales, de carbonato de magnesio; en la evaluación de la tendencia a formar depósitos en el agua, uno de los índices más útiles es el bien conocido Índice de Langelier; (2) corrosión: principalmente en metales ferrosos, ocasionada por el oxígeno disuelto en el agua y acelerada en el caso de aguas de bajo pH, baja alcalinidad y alto contenido de dióxido de carbono; (3) obstrucción de los sistemas por sedimentación de partículas en suspensión y (4) crecimientos biológicos, principalmente de bacterias de hierro y manganeso ("crenotherix"), bacterias del azufre y algas de diversos géneros. (21)

b.- Agua de Calderas

La formación de escamas en calderas, disminuye en forma notable el coeficiente de transmisión de calor y, consecuentemente, la eficiencia de las mismas. Los principales compuestos del agua responsables de

CUADRO III-1

CALIDAD DE AGUA REQUERIDA PARA ENFRIAMIENTO

Parámetro	Continuo de un solo paso	
	Dulce	Salobre (1)
Sólido (SO ₂)	50	25
Aluminio	(3)	(3)
Hierro	(3)	(3)
Manganeso	(3)	(3)
Calcio	200	420
Magnesio	(3)	(3)
Amoníaco	(3)	(3)
Incarbonato	600	140
Sulfato	680	2700
Cloruro	600	19000
Sólidos disueltos	1000	35000
Cobre	(3)	(3)
Zinc	(3)	(3)
Dureza (como CaCO ₃)	850	6250
Acidez mineral libre (como CaCO ₃)	(4)	(4)
Alcalinidad (como CaCO ₃)	500	115
pH	5.0-8.3	6.0-8.3
Color (unidades)	(3)	(3)
Sustancias orgánicas acuosas al azul de metileno	(3)	(3)
Extracto de tetra-cloruro de carbono	(6)	(6)
DQO	75	75
Oxígeno disuelto	(3)	(3)
Temperatura °F	(3)	(3)
Sólidos suspendidos	5000	2500
Sólidos totales	6000	37500

NOTAS:

- (1) Concentraciones en mg/l, excepto las indicadas en otra unidad.
- (2) Agua salobre es la que contiene más de 100 mg/l de sólidos disueltos.
- (3) Aceptada tal como se recibe si satisface sólidos totales e los otras limitaciones.
- (4) Cero o no determinada en la prueba correspondiente.
- (5) Controlada mediante tratamiento de otros componentes.
- (6) Sin aceite flotante.
- (7) El agua que se use no deberá tener a la vez todos los valores máximos indicados.

Ref.: 26

CALIDAD DE AGUA REQUERIDA PARA ENFRIAMIENTO

Parámetro	Reusada por recirculación	
	Dulce	Salobre (1)
Silice (SiO ₂)	50	25
Aluminio	0.1	0.1
Hierro	0.5	0.5
Manganeso	0.5	0.02
Calcio	50	420
Magnesio	(3)	(3)
Amoníaco	(3)	(3)
Incandescente	24	140
Sulfato	200	2700
Cloruro	500	19000
Sólidos disueltos	500	35000
Cobre	(3)	(3)
Zinc	(3)	(3)
Dureza (como CaCO ₃)	130	6250
Acidez mineral libre (como CaCO ₃)	(4)	(4)
Alcalinidad (como CaCO ₃)	20	115
pH	(3)	(3)
Color (unidades)	(3)	(3)
Sustancias orgánicas acuosas al azul de metileno	1	1
Extracto de tetra-cloruro de carbono	1	2
DQO	75	75
Oxígeno disuelto	(3)	(3)
Temperatura ° F	(3)	(3)
Sólidos suspendidos	100	100
Sólidos totales	600	35100

NOTAS:

- (1) Concentraciones en mg/l, excepto las indicadas en otra unidad.
- (2) Agua salobre es la que contiene más de 100 mg/l de sólidos disueltos.
- (3) Aceptada tal como se recibe si satisface sólidos totales o las otras limitaciones.
- (4) Cero o no determinada en la prueba correspondiente.
- (5) Controlada mediante tratamiento de otros componentes.
- (6) Sin aceite flotante.
- (7) El agua que se use no deberá tener a la vez todos los valores máximos indicados.

Ref.: 26

la formación de escamas y depósitos en las calderas son el carbonato de calcio, hidróxido de magnesio, sulfato de calcio y silicatos; una de las medidas más empleadas para prevenir la formación de escamas es por medio de ajustes de pH recomendándose valores de pH entre 10 y 11 ⁽²²⁾.

Las prácticas recomendables y los límites que deberán ser observados en las calderas según SIEMENS ⁽²⁵⁾, son los siguientes: los sólidos totales disueltos no deben exceder de 2000 mg/l, los sólidos totales no excederán los sólidos disueltos en más de un 10%, aceite, materia orgánica, etc. y los que se extraigan con éter o cloroformo (en solución acidificada al 1% con ácido clorhídrico) que no exceda de 7 ppm y la alcalinidad total, al anaranjado metilo, no excederá el 15% del total de sólidos disueltos en ppm.

Otras instituciones, tanto en EE.UU. ^(23, 24), como en México ⁽²⁶⁾, han propuesto normas de calidad de agua de alimentación de calderas; en el cuadro III-2, se reproduce una de las normas más aceptadas.

c.- Agua de Proceso

La calidad requerida del agua de proceso varía grandemente de un sector industrial a otro; así se tiene por ejemplo que el agua requerida en la manufactura de alimentos debe ser de calidad comparable a la del agua potable, el agua para la preparación de ciertas medicinas y refrescos tiene que ser de una pureza superior a la del agua potable; el agua para la fabricación de celulosa kraft sin blanquear pue-

CUADRO III-2

CALIDAD DE AGUA REQUERIDA PARA CALDERAS (1)

Parámetro	Presión de trabajo (lbs/pulg ²)			
	0-150	150-250	250-400	más de 400
Turbiedad (UJ)	20	10	5	1
Color (UC)	80	40	5	2
Oxígeno consumido	15	10	4	3
Oxígeno disuelto	1.4	0.1	0	0
pH	8.0	8.4	9.0	9.6
Dureza	80	40	10	2
Sólidos totales	500-300	500-2500	100-1500	50
Oxido de aluminio	5	0.5	0.05	0.01
Sílice	40	20	5	1
Carbonatos	200	100	40	20
Bicarbonatos	50	30	9	0
Hidróxidos	50	40	30	15
Sulfuro de hidrógeno	5	3	0	0
Tendencia de corrosión	No	No	No	No
Tendencia de escamado	No	No	No	No

(1) Unidades en mg/l, excepto las indicadas.

Ref.: 23

de ser de calidad comparable a la de un efluente secundario con cloración, etc.

III-1-3 Calidad del Agua para Distintas Industrias

a. - Industria Alimenticia

La industria alimenticia mexicana puede ser clasificada en tres categorías principales: (1) conservación y enlatado de frutas y vegetales, (2) conservación y enlatado de pescados y mariscos y (3) refinado de azúcar y sus derivados. Normas específicas de calidad de agua para estos tres grupos industriales no han sido elaboradas, pero sí puede afirmarse que la calidad mínima requerida es similar a la del agua para abastecimiento doméstico,⁽¹²⁾ lo que para fines de uso de aguas residuales implica tratamientos terciarios. Otra consideración de suma importancia que restringe el potencial de aprovechamiento de aguas residuales en la industria alimenticia es el hecho de que esta industria generalmente se ubica en sitios donde el agua es muy abundante, el caso más claro es el de los ingenios azucareros, que se localizan principalmente en las tierras bajas de las costas de Sinaloa, Nayarit y Jalisco, en la Huasteca y en las tierras bajas del Golfo, sitios todos donde el agua es barata y abundante.

b. - Industria del Hierro y el Acero

Las industrias elaboradoras de hierro, acero y productos derivados pueden clasificarse en tres categorías⁽²⁶⁾: (1) integradas,

(2) semiintegradas y (3) no integradas. dependiendo de la naturaleza de sus procesos, pero en términos generales, el mayor uso del agua dentro del sector industrial corresponde al renglón de enfriamiento, por lo que la calidad del agua requerida es independiente de la categorización anterior. El enfriamiento por contacto directo realizado en las plantas siderúrgicas en los trenes de laminación, únicamente incorpora al agua, partículas sólidas de óxido de hierro, por lo cual el agua de primer uso, no sufre degradaciones severas en su calidad. (18)

La práctica común es recircular internamente grandes porcentajes después de un tratamiento simple de sedimentación primaria para eliminar las partículas sólidas acarreadas. Estas prácticas son necesarias pues los suministros de caudales adecuados son críticos en las zonas semiáridas del norte del país, donde se localizan la mayoría de las plantas integradas. Las normas de calidad del agua requerida sólo reglamentan de manera definida los parámetros de sólidos totales, pH y temperatura; cabe mencionar que en la fabricación de hierro primario por reducción directa (hierro esponja), la calidad del agua es similar a la requerida por una caldera.

c.- Industria de la Celulosa y el Papel

Las plantas productoras de celulosa y papel pueden clasificarse en dos categorías (26): (1) integradas, que producen tanto celulosa como papel en cualquiera de sus variedades y (2) no integradas,

que producen únicamente celulosa o papel. La localización de la mayoría de estas plantas, es función de las fuentes de agua adecuadas para su abastecimiento, que es considerada como materia prima de vital importancia en las líneas de producción. Independientemente de la categoría de la industria, la calidad del agua requerida es característica de cada proceso específico y el criterio generalmente aplicado al respecto es el que proporcionan las normas TAPPI (21), confinadas en el cuadro III-3 y complementadas por la información referida en el cuadro III-4. Los parámetros que son objeto de un mayor control en el caudal de abastecimiento, son los sólidos totales y el color. Debido a las características de las materias primas empleadas y de los procesos de producción, estos parámetros se encuentran en grandes cantidades en los efluentes de las plantas de celulosa y papel y sólo son removidas efectivamente con tratamientos terciarios, lo que implica fuertes inversiones y elevados costos de operación. Es por esto, básicamente, que las prácticas de recirculación de las aguas residuales no han sido adoptadas en niveles significativos en nuestro país hasta la fecha, y los requerimientos de éste sector industrial sean cubiertos íntegramente con agua proveniente de fuentes naturales. (17)

d.- Industria Textil

La industria textil puede dividirse en tres grupos en función de la materia prima que emplee (26) : (1) algodón , (2) lana y (3) fibras sintéticas. Los procesos de fabricación son diferentes en cada caso, pues constan de diversas series de operaciones unitarias, pero no obs-

CUADRO III-3

CALIDAD DE AGUA REQUERIDA POR LA INDUSTRIA DEL PAPEL Y CELULOSA

Referencia	TAPPI E 600s-48	TAPPI E 601s-53		TAPPI E 602s-48	TAPPI E 603s-49
	Papeles Finos	Papel Blanqueado	Kraft Sin blanquear	Papel Pasta Madera	Celulosa Kraft
Turbiedad (SiO ₂)	10	40	100	50	25
Color (unidades)	5	25	100	30	5
Dureza Total (CaCO ₃)	100	100	200	200	100
Dureza de Calcio	50	-	-	-	50
Alcalinidad (CaCO ₃)	75	75	150	150	75
Fierr ^o	0.1	0.2	1.0	0.3	0.1
Manganes ^o	0.05	0.1	0.5	0.1	0.05
Clor ^o Residual	2	-	-	-	-
SiO ₂	20	50	100	50	20
Sólidos Disueltos	200	300	500	500	250
C O ₂	10	10	10	10	10
Cloruros	-	200	200	75	75
DBO	Lo menor posible				

-71-

Ref: 21

CUADRO III-4
NORMAS DE CALIDAD PARA DIFERENTES TIPOS DE
CELULOSA Y PAPEL

Características	Pulpa Mecánica	Pulpa química y papel	
		Sin blanquear	Blanqueado
Silice (SiO ₂)	(1)	50	50
Aluminio	(1)	(1)	(1)
Fierro	0.3	1.0	0.1
Manganeso	0.1	0.5	0.05
Zinc	(1)	(1)	(1)
Calcio	(1)	20	20
Magnesio	(1)	12	12
Sulfato	(1)	(1)	(1)
Cloruro	1 000	200	200
Sólidos disueltos	(1)	(1)	(1)
Sólidos suspendidos	(1)	10 (2)	10 (2)
Dureza (como CaCO ₃)	(1)	100	100
pH (unidades)	6.0-10.0	6.0-10.0	6.0-10.0
Color (unidades)	30	30	10
Temperatura (°C)	(1)	(1)	(1)

Notas:

Los valores indicados son máximos y están en mg/l excepto en donde se indique otra unidad y deberán considerarse antes de la adición de sustancias usadas para el acondicionamiento interno.

- (1) Aceptadas tal como se reciba si satisface las otras limitaciones.
- (2) Sin arenas o sólidos que produzcan coloraciones.

Ref: 26

tante, la calidad del agua requerida es prácticamente la misma. Estas normas de calidad (26), se incluyen en el cuadro III-5. En la actualidad, en nuestro país no se cuenta con dispositivos adecuados para realizar recirculaciones del agua de proceso a escalas dignas de mención. Los efluentes de la industria textil requieren de tratamientos biológicos exhaustivos, además de operaciones de acondicionamiento especiales en algunos casos, para ajustar la calidad requerida en las líneas de proceso; el principal problema es la remoción de color, que sólo es posible a un alto costo (coagulación química) y la eliminación de grasas, en los efluentes de las plantas procesadoras de lana.

e.- Industrias Química y Petroquímica

La industria química es la más diversificada de todas en cuanto a procesos y productos y también una de las que requieren agua de mayor calidad; no obstante, las normas generales (26) , presentadas en el cuadro III-6, no limitan estrictamente las características de los caudales de insumo a las plantas de producción, pues la regla que impera en la gran mayoría de los casos establece que el agua sea acondicionada de una manera específica en función del proceso de que se trate. (20) Las recirculaciones internas en este sector industrial se realizan ampliamente en el renglón referente a enfriamiento sin contacto con el producto, pero las aguas de desecho requieren de tratamientos secundarios para lograr una calidad factible de acondicionarse adecuadamente a los requerimientos específicos de cada proceso.

CUADRO III-5

CALIDAD DE AGUA REQUERIDA POR LA INDUSTRIA TEXTIL

Parámetro	Concentraciones por proceso (mg/l, excepto los indicados)			
	Suspensión para el Encolado	Lavado	Blanqueado	Teñido
Fierro	0.3	0.1	0.1	0.1
Magnesio	0.05	0.01	0.01	0.01
Cobre	0.05	0.01	0.01	0.01
Sólidos Disuel.	100	100	100	100
Sólidos Suspen.	5	5	5	5
Dureza como CaCO ₃	25	25	25	25
pH (unidades)	-	-	-	-
Algodón	6.5-10	9.0-10.5	2.5-10.5	7.5-10.0
Fibras sintéticas	6.5-10	3.0-10.5	(1)	6.5-7.5
Lana	6.5-10	3.0-5.0	2.5-5.0	3.5-6.0
Color	5	5	5	5

(1) No aplicable.

Ref: 26

CUADRO III-6

CALIDAD DE AGUA REQUERIDA POR LA INDUSTRIA DE PRODUCTOS QUIMICOS

Características	Químicos Orgánicos	Hule Sintético	Gomas y Productos Químicos de Madera
Silice (SiO ₂)	(2)	(2)	50
Hierro	0.1	0.1	0.3
Magnesio	0.1	0.1	0.2
Calcio	68	80	100
Magnesio	19	36	50
Bicarbonato	128	-	250
Sulfato	(2)	(2)	100
Cloruro	(2)	(2)	500
Nitrato	(2)	(2)	5
Sólidos totales	-	-	1000
Dureza (como CaCO ₃)	250	350	900
pH (unidades)	6.5-8.7	6.2-8.3	6.5-8.0
Color (unidades)	(2)	20	20
Sólidos suspendidos	(2)	5	30
Olor	(2)	(2)	(3)
DBO a 5 días y 20° C	(2)	(2)	(4)
DOQ (O ₂)	(2)	(2)	(4)
Oxígeno disuelto (O ₂)	(2)	(2)	(1)
Alcalinidad (CaCO ₃)	125	150	200

NOTAS:

- (1) Agua Potable.
- (2) Aceptada tal como se reciba si satisface los sólidos totales
- (3) No hay límite práctico pues puede manejarse cualquier concentración.
- (4) Controlada mediante el tratamiento para otros componentes.

Ref: 26

f. - Industria de la Curtiduría de Pieles

Esta industria no requiere en términos generales de agua de excelente calidad, excepto en los procesos de coloración. Las normas establecidas ⁽²⁶⁾, para las fuentes de suministro se presentan en el cuadro III-7. El reuso de las aguas residuales de esta actividad es muy limitado en nuestro país, pues debido a la naturaleza de los desechos orgánicos arrastrados, la concentración encontrada de organismos del grupo coliforme es alta. El tratamiento adecuado para reusar estas aguas deberá ser cuando menos secundario, incluyendo cloración.

g. - Industria Petrolera

La industria del petróleo requiere de grandes cantidades de agua principalmente destinada a enfriamiento sin contacto con el producto. Las normas de calidad ⁽²⁶⁾, del agua requeridas para ésta y otras operaciones básicas son presentadas en el cuadro III-8.

Los efluentes de una refinería son difíciles de usar por recirculación en la misma planta o en otros usos, pues contienen grandes concentraciones de metales pesados, fenoles, cianuros, grasas y aceites, además de gran cantidad de materia orgánica disuelta. Es necesario realizar tratamientos biológicos y adición de reactivos químicos para acondicionar la calidad de las descargas a los niveles de tolerancia requeridos en las líneas de alimentación de las refinerías y así poder reusar los grandes caudales desechados. ⁽²⁷⁾

Habiendo gran semejanza entre la industria petrolera y la del carbón mineral, las normas de calidad requerida por esta última son las

CUADRO III- 7

CALIDAD DE AGUA REQUERIDA POR LA INDUSTRIA
DEL CURTIDO Y ACABADO DE PIELS

Parámetro	Procesos de Curtido	Procesos de Acabado en General	Procesos de coloración
Alcalinidad (CaCO ₃)	(2)	(2)	(2)
pH (unidades)	6.0-8.0	6.0-8.0	6.0-8.0
Dureza (CaCO ₃)	150	(3)	(4)(5)
Calcio	60	(3)	(4)(5)
Cloruro	250	250	(6)
Sulfato	250	250	(6)
Fierro	50	0.3	0.1
Manganeso	(6)	0.2	0.01
Sustancias orgánicas	-	-	-
Extracto de carbón-cloroformo	(6)	0.2	(4)
Color (unidades)	5	5	5
Bacterias coliformes	(7)	(7)	(6)
Turbiedad	(4)	(4)	(4)

Notas:

- (1) Concentraciones en mg/l, excepto las indicadas en otra unidad.
- (2) Aceptada tal como se recibe si satisface las otras limitaciones.
- (3) Ablandada con cal.
- (4) Cero o no descubierta mediante la prueba correspondiente.
- (5) Agua destilada o desmineralizada.
- (6) Concentración desconocida.
- (7) De acuerdo con las normas de calidad para agua potable del USPHS de 1962.

Ref: 26

CUADRO III-8

CALIDAD DE AGUA REQUERIDA POR LA INDUSTRIA
DEL PETROLEO Y CARBON MINERAL

Parámetro	Concentraciones
Sílice (SiO ₂)	(2)
Fierro	1
Calcio	75
Magnesio	30
Sodio y potasio totales (Na ⁺ + K ⁺)	(2)
Bicarbonato	(2)
Sulfato	(2)
Cloruro	300
Fluoruro	(2)
Nitrato	(2)
Sólidos disueltos	1 000
Sólidos suspendidos	10
Dureza (como CaCO ₃)	350
Dureza de no carbonatos (como CaCO ₃)	70
Color (unidades)	(2)
p H (unidades)	6.0-9.0

Notas:

1. - Concentraciones en mg/l, excepto las indicadas con otra unidad.
2. - Aceptada tal como se reciba si satisface las otras limitaciones.

Ref:26

mismas que las del cuadro III-8 ; asimismo, los problemas citados referentes al reuso y calidad de las descargas son semejantes.

III-1-4 Alternativas de Tratamiento

Los efluentes de origen doméstico son en general tratables en forma económica por medio de sistemas biológicos de tal forma que se ajuste la calidad del agua tratada a los requerimientos anteriormente mencionados, siendo factible su aprovechamiento principalmente con fines de enfriamiento, lavado de patios y áreas de servicio, riego de zonas verdes dentro de las industrias e inclusive para algunos procesos tales como la elaboración de celulosa y algunas clases de papel (kraft).⁽⁸⁾ Sin embargo, la práctica de descargar desechos industriales en los sistemas de alcantarillados urbanos es bastante frecuente en nuestro país, sobre todo por las industrias de pequeña capacidad ubicadas dentro de las ciudades. Esto crea una serie de problemas en el momento de tratar las aguas negras, pues sus características básicas se ven fuertemente modificadas y es necesario adicionar unidades auxiliares para la remoción de contaminantes tales como, metales pesados, grasas y aceites, una gran cantidad extra de sólidos y productos químicos de alta toxicidad; esto redunda en un aumento sustancial de los costos de tratamiento y, dependiendo de la naturaleza de esos desechos industriales, puede incluso disminuir la factibilidad de reuso de este recurso.

Es frecuente, en países altamente industrializados con necesidades de reusar sus aguas de desecho de origen doméstico, conducir las aguas



negras generadas en los grandes centros de población, por medio de colectores, hasta plantas de tratamiento situadas en las cercanías de los núcleos industriales que, posteriormente, reusarán los efluentes de dichas plantas. Estas operaciones se han probado como las más eficientes tanto técnicamente como económicamente.

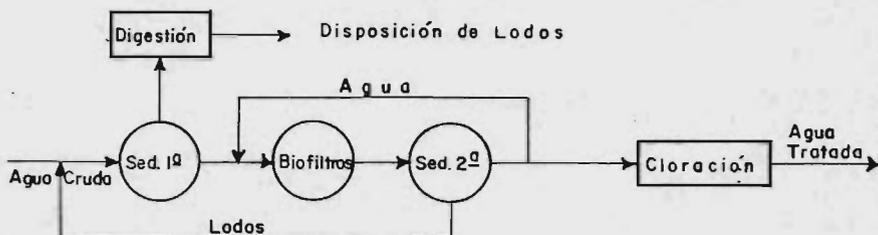
III-1-5 Descripción de los Procesos de Tratamiento

Considerando que las aguas residuales domésticas en México presentan una proporción adecuada de nutrientes (DBO:N:P ; 100:15:25)⁽¹³⁾ para asegurar la eficiencia del tratamiento biológico, y que los caudales factibles de reutilizarse se encuentran en el ámbito de 25 a 300 l/seg, se han seleccionado, de entre los sistemas de tratamiento económico que presenta la referencia 13, los procesos denominados: aereación extendida, sistema secundario con biofiltro y el de lodos activados convencional, cuyos diagramas de flujo se muestran en la figura III-1, y que ofrecen grandes ventajas para su implantación con fines de reuso de agua residual doméstica en la industria,

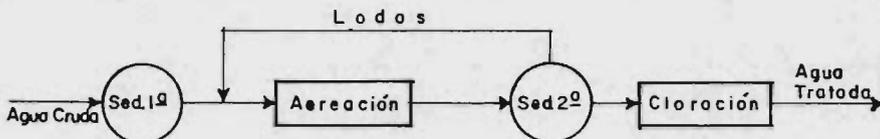
- La alternativa más conveniente para el tratamiento de caudales hasta 50 l/seg es aereación extendida; su aplicación principal es cuando existen restricciones de espacio y la calidad del efluente tratado es aplicable en el riego de jardines y para alimentación en enfriamiento. Este proceso presenta la ventaja de no requerir digestión de lodos en las diversas unidades de tratamiento,



AEREAACION EXTENDIDA



SECUNDARIO CON BIOFILTRO



CONVENCIONAL LODOS ACTIVADOS

DIAGRAMAS DE FLUJO DE TRATAMIENTO DE AGUAS

RESIDUALES .

ya que los producidos son recirculados y en caso de ser excesivos, parte de ellos se disponen en lechos de secado; asimismo, no requieren de personal especializado ni de laboratorio para el control de la operación. Este proceso requiere de inversiones en equipo mínimo, ya que sólo se necesitan motores de agitación superficial o sopladores, motor y rastras del sedimentador y equipo de cloración. La eficiencia de remoción del proceso es de 85% y de requerirse mejor calidad de agua, es opcional la instalación de un sistema terciario de tratamiento. (13)

- Los caudales entre 50 y 100 l/seg son factibles de tratar en sistemas secundarios con biofiltro ya que para gastos mayores las dimensiones del biofiltro lo hacen inconstable. Este proceso requiere de mayor espacio que el de aereación extendida pero presenta las mismas ventajas de no requerir personal especializado ni laboratorio de control y la calidad del efluente tratado es aceptable para fines de enfriamiento y riego de áreas verdes. La eficiencia de remoción del proceso es de 90% y su operación es sumamente sencilla. La inversión en equipos es mayor que en el proceso de aereación extendida ya que además del equipo mencionado para este último, se requiere de un sistema hidráulico para la operación del biofiltro y de una unidad de tratamiento de lodos. (13)

- El proceso "convencional de lodos activados" se emplea para el tratamiento de caudales mayores de 125 l/seg. La calidad del efluente tratado es adecuada para el riego de áreas verdes y, en general, es el proceso más experimentado para reutilizar el agua en enfriamiento

y procesos; requiere de grandes espacios, un edificio de control, laboratorio, salas de operación, equipo costoso y sobre todo, personal altamente capacitado. La eficiencia del proceso es del 95%.⁽¹³⁾

III-1-6 Costos de Tratamiento

No es posible establecer de una manera categórica y generalizada los costos de tratamiento del agua residual, ya que estos son función de una amplia gama de factores la mayoría de las veces fluctuantes. Algunos factores que afectan los costos de tratamiento directamente son:⁽¹⁸⁾

- 1.- la localización geográfica de la planta de tratamiento.
- 2.- el carácter metropolitano o rural del predio.
- 3.- salarios a personal y empleados y las estipulaciones de los contratos de trabajo.
- 4.- el transporte de hombres, material y equipo.
- 5.- los códigos locales de construcción.
- 6.- las necesidades de implementos de seguridad.

Por otro lado, los costos de construcción dependen de muchas y variadas condiciones, lo que dificulta aún más determinar de una manera definitiva el monto de la inversión a realizar.

Estos factores, además de otros no mencionados influyen definitivamente en la variación de las estimaciones sobre costos unitarios de tratamiento, siendo su determinación objeto de estudios adicionales fuera del propósito de esta tesis, por lo que, en lo referente a las estimaciones sobre tal aspecto, se consideró conveniente reportar únicamente la metodología general de la estimación, así como un

breve resumen de los costos unitarios reportados en la bibliografía consultada, sobre los sistemas de tratamiento incluidos en la sección anterior.

En la estimación de los costos unitarios de tratamiento debe considerarse lo siguiente:

- a. - inversión inicial
 - b. - erogación por amortización
 - c. - erogación por operación y mantenimiento y
 - d. - volúmen de agua residual
- a. - Para el primer aspecto, es conveniente desglosar los costos derivados del suministro de equipo como motores, rejillas, medidores, válvulas, tubería, piezas especiales, etc.; costo de la obra civil que es función directa del volúmen tratado y de las especificaciones del proceso; finalmente los costos derivados de adquisición del terreno y de la instalación y montaje de los aditamentos requeridos, obras auxiliares y accesorias (8). En el cuadro III-9, se presenta una estimación de éstos costos, considerando las alternativas de tratamiento siguientes:

Gasto a Tratar (l/seg)	Alternativa de Tratamiento
25 a 50 75 a 100 150-200-250 y 300	aereación extendida secundario con biofiltro convencional de lodos activados

- b. - En lo referente a erogaciones por amortización debe considerarse las condiciones de operación mercantil de la planta de tratamiento a fin de fijar el monto y plazo de la recuperación del capital invertido en función de la vida útil del equipo y la depre-

CUADRO III-9

CALCULO DE LAS INVERSIONES POR TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

(miles de pesos)

Capacidad (l/seg)	Inversión Obra Civil (\$)	Inversión en Equipo e Instalación (\$)	Obras Accesorias (\$X1)	Tuberías interconexión y piezas Especiales (\$X2)	Instalación Eléctrica (\$X3)	Inversión Total (\$)
25	1 282	363	82	82	82	1 891
50	2 008	793	140	140	140	3 221
75	4 264	2 030	472	315	315	7 396
100	5 090	2 287	553	369	369	8 668
150	3 925	5 217	1 371	686	1 143	12 342
200	4 815	6 693	1 726	863	1 438	15 535
250	5 577	7 277	1 928	964	1 607	17 353
300	6 180	8 186	2 155	1 077	1 796	19 394

(1) Las obras accesorias incluyen: oficina, laboratorio, equipo y reactivos de laboratorio, caseta de entrada, accesos, jardines y cerca perimetral. Se han estimado en función de porcentajes de la inversión de obra civil y equipos: 5% (gastos de 25 y 50 l/seg), 7.5% (gastos de 75 y 100 l/seg) y 15% (gastos de 150 a 300 l/seg).

(2) Las tuberías y piezas especiales, se han calculado en función de porcentajes de la inversión de obra civil y equipos: 5% (gastos de 25 a 100 l/seg) y 7.5% (gastos de 150 a 300 l/seg).

(3) Las instalaciones eléctricas incluyen: subestación, alumbrados exteriores e interiores, tierras y fuerza y se han calculado en función de porcentajes de la inversión de obra civil y equipos: 5% (gastos de 25 a 100 l/seg) y 12.5% (gastos de 150 a 300 l/seg).

Ref: 8

ciación anual. En México las plantas de tratamiento con fines de reuso son generalmente para proporcionar un servicio y no con fines lucrativos por lo que usualmente se fija la vida útil del equipo y obra civil de 10 a 20 años y una tasa de amortización del 10 al 15% anual ⁽⁸⁾.

c.- Los costos anuales por operación y mantenimiento se estiman en función de los costos de energía, personal, reactivos, reposición o reparación del equipo original y gastos menores varios. Los costos mencionados se pueden estimar con base a la consideración de que varían entre el 100 y 200% de los costos anuales del capital invertido. ⁽¹⁸⁾

d.- Finalmente considerando el volumen de agua residual tratada anualmente y los costos b y c, se determina el costo unitario de tratamiento, mismos que se reportan para las diversas alternativas estudiadas, en el cuadro III-10.

La factibilidad de reuso de agua en la industria debe contemplar, además de los sistemas de tratamiento, obras tales como redes de conducción de aguas crudas (sin tratar) a la planta de tratamiento y redes de distribución del agua tratada para su íntegro aprovechamiento. Al respecto y con objeto de reducir costos por estos conceptos, la política industrial nacional se inclina por la agrupación de empresas afines en parques industriales o distritos de control de contaminación, a fin de proporcionar un sistema de entrega de agua en bloque, compartiendo entre las industrias beneficiadas los costos de tratamiento. ⁽³⁾

Bajo la suposición de esta agrupación industrial y considerando longi-

CUADRO III 10

INVERSIONES Y COSTOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Concepto	Módulos de Tratamiento							
	Aeración Extendida		Biofiltración		Lodos Activados			
	25	50	75	100	150	200	250	300
Inversión Total (\$)	460 000	936 000	3 591 000	6 030 500	9 920 000	16 704 000	24 488 000	30 789 000
Erogación por Amortización (\$/año)	67 620	137 592	527 877	886 483	1 458 240	2 455 488	3 599 736	4 525 983
Erogación anual por Operación (\$/año)	109 868	252 114	290 921	458 131	1 909 604	2 103 025	2 490 070	2 876 708
Erogación anual por Mantenimiento (\$/año)	2 705	5 504	21 115	35 459	58 330	98 219	143 989	182 392
Erogación anual Total (\$/año)	180 193	395 210	839 913	1 407 073	3 426 174	4 656 732	6 233 795	7 585 083
Gasto (m ³ /año)	788 400	1 576 800	2 365 200	3 153 600	4 730 400	6 307 200	7 884 000	9 460 800
Costo Unitario (\$/m ³)	0.22	0.25	0.35	0.45	0.72	0.73	0.79	0.80

Ref: 8

-87-

tudes máximas de separación entre la industria más lejana y la planta de tratamiento de 2000 m., se estiman los costos de conducción unitarios, mismos que resultan de 0.0019 a 0.067 \$/m³ (1973)⁽⁸⁾

Los costos unitarios de tratamiento, decrecen conforme se incrementa el volumen de conducción siendo su variación mucho más drástica que la debida al incremento de costos por la longitud de la línea de conducción.

III-1-7 Atractivos del Reuso y Aplicación Actual.

Entre las ventajas y atractivos del reuso del agua en la industria resaltan las que a continuación se anotan:

- a.- Al controlar la contaminación del agua en los núcleos urbanos, la capacidad de los sistemas de alcantarillado y colectores de aguas negras no necesitará ser aumentada ya que se deriva para el reuso, parte de las aguas generadas.
- b.- Se liberan para otros requerimientos en su lugar de origen las aguas para primer uso que ya no habrá necesidad de captar y conducir de fuentes externas, evitándose así no sólo problemas de tipo social y político, sino las perturbaciones innecesarias en los sistemas hidrológicos del país.
- c.- La vialidad inmediata de las obras necesarias para abastecer las demandas de agua para uso industrial, crearán entre los industriales una nueva conciencia de su valor, y ésto traerá como consecuencia un uso más racional del agua dentro de las industrias y una mayor recirculación interna.

Entre los beneficios económicos que representa la reutilización de aguas, podemos indicar que un gran número de parques y ciudades industriales se abastecen de agua de primera calidad de los sistemas municipales o de pozos particulares, pagando en el primer caso cuotas elevadas y en el segundo, el elevar el agua a niveles aprovechables, conduce a un consumo de energía eléctrica excesivo, que en algunos casos resulta de mayor precio que el que se pagaría por recibir agua residual tratada. (26)

Actualmente se reusa el agua en el país con fines industriales y riego de áreas verdes en las zonas que padecen escasez como son la ciudad de México, el área metropolitana y Monterrey, N.L.

La colaboración de la iniciativa privada de la ciudad de Monterrey, N.L. para aliviar la escasez en el suministro de agua potable, condujo a Celulosa y Derivados, S.A., en 1954, a reutilizar el agua en su industria de manufactura de fibras sintéticas y papel transparente. Posteriormente, continuaron con ese mismo interés de desarrollo industrial para aprovechar aguas residuales tratadas, otras empresas como Aceros Planos, S.A. (1961), Papelera Maldonado, S.A. (1963), Termoeléctrica de Monterrey (1963) y Agua Industrial de Monterrey, S.A. (1966). Esta última empresa destina el agua tratada en diversas industrias de elaboración de hierro esponja, pigmentos, insecticidas, papel acero y otros productos, en los diferentes usos como son: limpieza, riego de jardines, contra incendio, enfriamiento y calderas (pretratada con sulfato de calcio y cloruro férrico).

Por otro lado, las autoridades del Distrito Federal se han avocado desde hace 25 años a la tarea de implantar y operar sistemas de tratamiento para la reutilización de agua destinada a riego de áreas verdes a surtir de agua a los lagos recreativos y usos industriales, continuando hasta la fecha con ésta política.

Las plantas con que se cuenta actualmente son: Chapultepec, San Juan de Aragón, Ciudad Deportiva, Xochimilco, Acueducto Guadalupe, Cerro de la Estrella y algunas otras del sector privado como son: San Juan Ixhuatepec, Termoeléctrica del Valle de México y Termoeléctrica de Tula, Hgo.

El cuadro III-11 presenta la relación de capacidades y el tipo de tratamiento de las plantas con fines de reutilización que operan actualmente, mencionándose que están en etapa de construcción la planta de reutilización industrial de Lechería con capacidad de 400 l/seg y las de Ecatepec y Lago Texcoco en etapa de proyecto.

CUADRO III-11

CAPACIDAD Y TIPO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO EN OPERACION

Denominación		Capacidad (l/seg)	Tipo de Planta
Monterrey, N. L.	Celulosa y Derivados, S.A.	160	Lodos activados
	Aceros Planos, S.A.	160	Lodos activados
	Papelera Maldonado, S.A.	60	Lodos activados
	Termoeléctrica	150	Lodos activados
	Agua Industrial de Monterrey, S.A.	300	Lodos activados
México, D.F.	Chapultepec	80	Lodos activados - Digestión Anaeróbica
	San Juan de Aragón	500	Lodos activados
	Ciudad Deportiva	80	Lodos activados
	Xochimilco	800-1250	Lodos activados
	Acueducto Guadalupe	80	Lodos activados
	Cerro de la Estrella	2000	Lodos activados
	Termoeléctrica del Valle de México	150	Lodos activados
	San Juan Ixhuatepec	150	Lodos activados

III-2 Reutilización del Agua Residual en la Agricultura

El aprovechamiento de agua residual doméstica en riego es una práctica ampliamente conocida desde hace mucho tiempo y hasta cierto punto bien acogida en función de sus cualidades fertilizantes, reconocidas aún a niveles empíricos. Sin embargo, a partir del inicio de la llamada revolución industrial, las aguas residuales han cambiado virtualmente sus características originales debido a la incorporación de efluentes de industrias muy variadas, planteando la interrogante de su aptitud para el aprovechamiento con fines de irrigación. Dadas éstas condiciones, diversos organismos mundiales preocupados por la conservación y protección del medio ambiente se han avocado a la investigación, a nivel de campo y laboratorio, de los riesgos y efectos de la aplicación de determinadas calidades de agua en la agricultura, llegando a normalizar a través de concentraciones máximas permisibles, la cantidad de contaminantes en el agua de riego que permita un desarrollo saludable de los cultivos y que no -- presente riesgos a los consumidores inmediatos de los productos agrícolas -- obtenidos bajo tal régimen de riego.

El reuso de agua residual en la agricultura plantea básicamente dos tipos de problemas que deben ser investigados con el fin de evaluar los beneficios que de dicho reuso se derivan. Por una parte, existe el problema de la contaminación de los suelos debido a la incorporación de sales inorgánicas, metales pesados y sustancias tóxicas que el agua residual contiene en muy variadas concentraciones dependiendo de las características de la fuente generadora. El efecto de ésta contaminación se manifiesta en un decremento de la productividad unitaria de cultivos, llegando en ocasiones extremas a imposibilitar el de-

sarrollo de cualquier cultivo o a restringir el consumo de estos en función de acumulación de sustancias tóxicas en los tejidos vegetales. Por otra parte, - existe el problema sanitario causada por la presencia de organismos patógenos en el agua residual, que pueden presentar serios riesgos de contaminación a -- los cultivos en desarrollo. La investigación de este problema sanitario es de -- (28) gran importancia en nuestro país, ya que en México, las gastroenteritis ocupan el segundo lugar como causa de muerte, lo que en buena parte puede ser atribuido a la contaminación bacteriana en los campos de riego con agua residual :

Habiendo estudiado anteriormente el volumen, y brevemente la calidad de las aguas residuales generadas por el sector doméstico y algunas ramas productivas del sector industrial, es objeto de esta sección, encaminada a determinar la -- factibilidad técnica del reuso de aguas residuales, el presentar una recopilación de las principales normas sobre calidad de agua para riego, a fin de evaluar a grandes rasgos, las condiciones de aprovechamiento del recurso proponiendo, - los sistemas de tratamiento en caso de requerirse una calidad de agua superior.

III-2-1 Calidad de Agua Requerida.

Dentro de la información recopilada, destacan por su relevancia, los trabajos - llevados a cabo en los Estados Unidos y en la URSS, ⁽²⁸⁾ ⁽²⁹⁾ sobre las condiciones del aprovechamiento de agua residual en riego, aportando una serie de normas y limitaciones no sólo con respecto a la calidad del agua permisible o tolerable, si no con respecto a las condiciones generales de las zonas de riego. De dichas -- fuentes de información así como de otras más, se han recopilado los índices

y parámetros de calidad del agua de riego que a continuación se exponen:

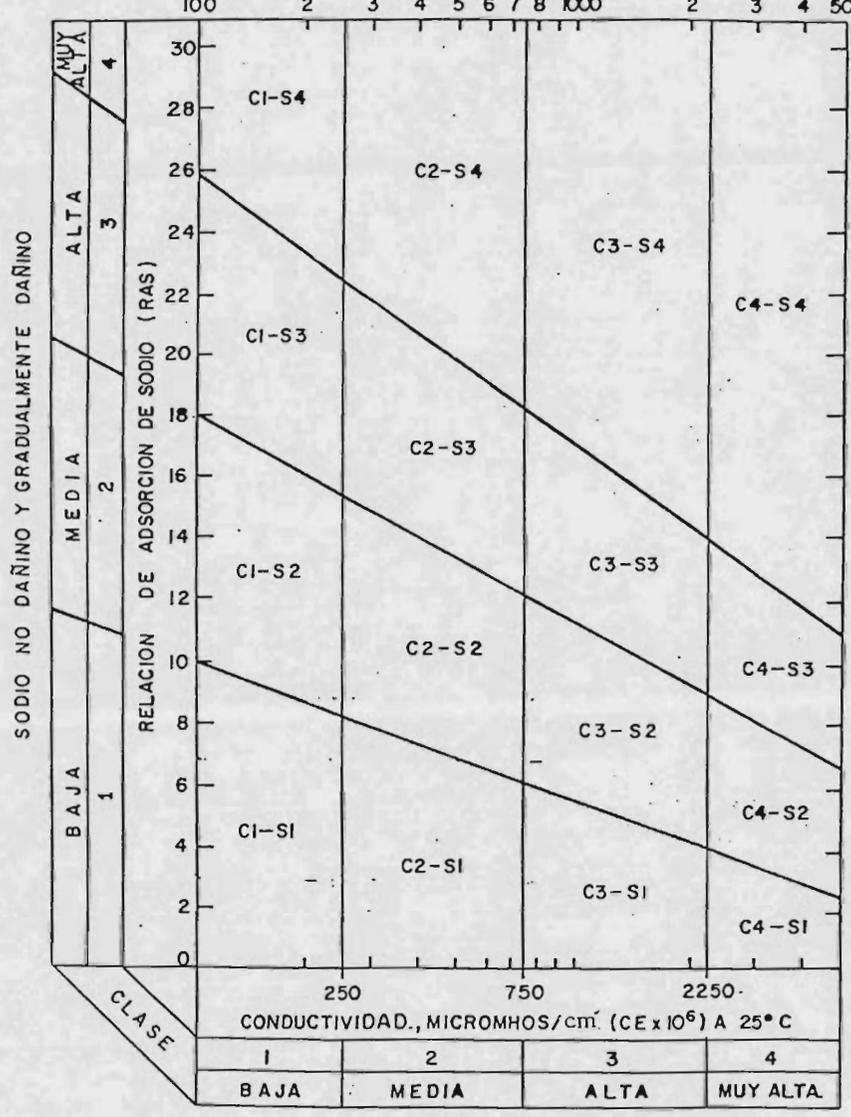
a) Clasificación de las aguas en función de la salinidad. (30)

Esta clasificación toma en consideración la conductividad eléctrica y la relación de absorción de sodio (RAS), como se indica gráficamente en el --- diagrama de clasificación de aguas de riego, de la figura III-2.

La interpretación de este diagrama toma en cuenta el uso del agua en función de la clase de suelo y proporciona los lineamientos para evitar los perjuicios que tiene el utilizar agua de riego inapropiada;

- Agua de baja salinidad. C 1 : Puede usarse para riego de la mayor parte - de los cultivos en casi cualquier tipo de suelos con muy poca probabilidad de que se desarrollen problemas de salinidad. Si el suelo necesitara algún lavado, este se logra en condiciones normales de riego, excepto cuando se trata de suelos de muy baja permeabilidad.
- Agua de salinidad media. C-2: Puede usarse siempre y cuando no haya un grado moderado de su uso, en casi todos los casos y sin necesidad de prác- ticas especiales de control de salinidad se pueden desarrollar las plantas moderadamente tolerantes a las sales.
- Agua altamente salina. C-3 : No puede usarse en suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aún con drenaje adecuado puede necesitarse de prácticas es- peciales de control de la salinidad, debiendo por lo tanto, seleccionar úni camente aquellas especies vegetales muy tolerantes a las sales.
- Agua de Salinidad muy Alta. C-4 : No es propia para riego bajo condicio--

Fig. III-2



SALINIDAD NO DAÑINA Y GRADUALMENTE DAÑINA

DIAGRAMA DE CLASIFICACION PARA AGUAS DE IRRIGACION

Ref.: 30

nes ordinarias, pero puede usarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeable, el drenaje adecuado, debiendo aplicarse un exceso de agua para lograr un buen lavado; en este caso de deben seleccionar cultivos altamente tolerables a las sales.

- Agua Baja en Sodio. S-1: Puede usarse para el riego en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio inter cambiabile. No obstante, los cultivos sensibles como algunos frutales y el aguacate pueden resultar perjudicados en ocasiones.
- Agua Media en Sodio. S-2 : En suelos de textura fina, el sodio representa un peligro considerable, más aún si dichos suelos poseen una alta capacidad de intercambio de cationes, especialmente bajo condiciones de lavado deficiente, a menos que el suelo contenga yeso. Estas aguas sólo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.
- Agua Alta en Sodio. S-3 : Puede producir niveles tóxicos de sodio inter cambiabile en la mayoría de los suelos, por lo que estos necesitarán prá cticas especiales de manejo (buen drenaje, fácil lavado y adiciones de materia orgánica).
- Agua muy Alta en Sodio. S-4 : Es inadecuada para riego, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio del suelo y/o la aplicación de yeso u otros mejoradores no hacen antieconómico el empleo de esta clase de agua.

b) Clasificación por conductividad eléctrica⁽³¹⁾

En función de la concentración de sólidos disueltos totales (5 a 5 000mg por

litro) y la conductividad eléctrica (0.75 a 7.50 mmhos/cm) se presentan en el cuadro III-12; las respuestas de los cultivos al aplicarse agua entre los ámbitos indicados a partir de no tener efectos perjudiciales, hasta preveer - el riego únicamente de plantas tolerantes a las sales, con prácticas de ma-
nejo adecuadas inclusive en suelos permeables.

c) Clasificación en función del contenido del carbonato de sodio residual (CSR)⁽³⁰⁾

Cuando en el agua de riego el contenido de carbonatos y bicarbonatos es -- mayor que el calcio y el magnesio, existe la posibilidad de que se forme - carbonato de sodio, debido a que, por su alta solubilidad, puede permane- cer en solución, aún después de que se han precipitado los carbonatos de -- calcio y magnesio. En estas condiciones, la concentración total y relativa del sodio puede ser suficiente para desplazar el calcio y el magnesio de -- complejo de intercambio, produciendo la defloculación del suelo.

Este índice se calcula con la siguiente fórmula:

$$CSR = (\text{CO}_3^{\bar{}} + \text{HCO}_3^{\bar{}}) - (\text{Ca}^{++}) \text{ (me/l)}^*$$

* me = miliequivalentes = meq

El cuadro III-13, presenta la clasificación por valores de CSR para lmites entre < 1.25 a 2.50 me/l; si hay un valor superior, resulta inadecuado el uso de las aguas. Cuando la diferencia es negativa en la fórmula, no existe el problema y el valor de CSR puede suponerse igual a cero.

d) Boro.⁽³²⁾

Los cultivos regados con aguas conteniendo el elemento boro se han calsifi

✓

CUADRO III-12

CLASIFICACION DE LAS AGUAS DE RIEGO EN FUNCION DE LA
CONCENTRACION DE SOLIDOS TOTALES DISUELTOS
Y CONDUCTIVIDAD ELECTRICA

Respuesta del Cultivo	Sólidos Totales Disueltos (mg/l)	Conductividad Eléctrica (mmhos/cm)
Agua que no ocasiona efectos perjudiciales notablemente	5- 500	0.75
Agua que puede ser perjudicial en cultivos sensibles	500-1000	0.75-1.50
Agua que puede tener efectos adversos sobre varias cosechas y que requiere cuidado en las prácticas de manejo del suelo	1000-2000	1.50-3.00
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes a las sales con cuidadosas prácticas de manejo y sobre suelos permeables	2000-5000	3.00-7.50

Ref: 31

CUADRO III-13

CLASIFICACION DE LAS AGUAS DE RIEGO EN FUNCION DEL
CARBONATO DE SODIO RESIDUAL

	CSR (mg/l)
Aguas inadecuadas para irrigación	más de 2.50
Uso de aguas de riego con riegos	1.25 - 2.50
Aguas adecuadas para irrigación	menores de 1.25

Ref: 30

✓

cado según el grado de tolerancia en sensibles, semitolerantes y tolerantes, y conforme a esta división las aguas de riego, se definen como inadecuadas (> 1.25 a 3.75 mg/l) hasta excelentes para riego (0.33 a < 1.00 mg/l), como se indica en el cuadro III-14.

e) Manganese. ⁽³³⁾

El manganeso ha resultado dañino para algunos cultivos en concentraciones mínimas de 0.5 a 1.0 mg/l en plantas y legumbres; en concentraciones elevadas de 150 a 200 mg/l para cultivos resistentes como la avena. En el cuadro III-15 se establecen los límites a los que resultan perjudiciales los contenidos de manganeso en aguas de riego.

f) Salinidad potencial. (SP) ⁽³⁴⁾

Es un índice que estima el peligro de las sales como cloruros y sulfatos al quedar en solución a bajos niveles de humedad en suelo y por consiguiente aumentando la presión osmótica. Este índice se calcula con la siguiente fórmula:

$$SP = Cl^- \times 1/2 SO_4^{=} \quad (me/l)$$

La clasificación del agua en primera, segunda y tercera clases depende del valor del índice (SP) lo cual condiciona el uso del agua en suelos de texturas pesadas a ligeras como se observa en el cuadro III-16.

g) Porcentaje de sodio posible (PSP) ⁽³⁴⁾

El peligro del desplazamiento del calcio y del magnesio por el sodio, en el complejo de intercambio, empieza cuando el contenido de sodio en solución

CUADRO III-14

CLASIFICACION DEL AGUA DE RIEGO SEGUN
EL CONTENIDO DE BORO

Clase de Agua de Riego	Tolerancia de los Cultivos		
	Sensibles	Semitolerantes	Tolerantes
	B o r o (m g / l)		
Excelente	< 0.33	< 0.67	< 1.00
Buena	0.33-0.67	0.67-1.33	1.00-2.00
Permisible	0.67-1.00	1.33-2.00	2.00-3.00
Dudosa	1.00-1.25	2.00-2.50	3.00-3.75
Inadecuada	> 1.25	> 2.50	> 3.75

Ref:32

CUADRO III-15

CONCENTRACIONES DE MANGANESO CONTENIDAS
EN EL AGUA DE RIEGO DAÑINAS A ALGUNOS CULTIVOS

Cultivo	Concentración (mg/l)
Plantas	0.5-3.5
Legumbres	1.0-10.0
Simiente de naranja y mandarina	5.0
Tomate	5.0-10.0
Frijol soya	10.0-25.0
Lino	25.0-100.0
Avena	150.0-200.0

Ref: 33

representa más de la mitad de los cationes disueltos; por consiguiente, el porcentaje de sodio posible (PSP), está referido a la salinidad efectiva (SE) y se calcula en la forma siguiente:

$$\text{PSP} = \frac{\text{Na}^+}{\text{SE}} \times 100$$

La clasificación del agua es buena para riego o con peligro de solidificación, dependerá del porcentaje resultante (< 50%) buena para riego, y --- (> 50% y > 10me/l Na) peligro de sodificación bajo condiciones distintas de suelo desde cualquier clase hasta texturas medias o pesadas como se presenta en el cuadro III-17.

h) Contenido de sodio y sales.⁽³⁵⁾

En la figura III-3, se muestra la clasificación del agua de riego en buena, dudosa o inadecuada, dependiendo del contenido de sodio equivalente entre 0 y 100; y la concentración de sales en el agua entre 0 y 300 mg/l.

i) Cloruros⁽³⁴⁾

El contenido de cloruros en las aguas de riego (< 1.0 a > 5.0 me/l) define la clase de agua en buena, condicionada y no recomendable. Esta clasificación depende de los valores que tengan los siguientes índices:

- Buena. -

a) Aguas con menos del 20% de $\text{CO}_3^{=}$ + HCO_3^-

Clasificación C-1, S-1

CUADRO III-16

CLASIFICACION DEL AGUA DE RIEGO

SEGUN SU SALINIDAD POTENCIAL

Condición del Suelo	C l a s e		
	Primera	Segunda	Tercera
Textura pesada, baja velocidad de infiltración (0.5 cm/h), nivel freático somero	< 3	3 a 5	> 5
Textura media, velocidad de infiltración (2 cm/h) nivel freático poco profundo.	< 5	5 a 10	> 10
Textura ligera, velocidad de infiltración alta (> 2 cm/h), nivel freático profundo.	< 7	7 a 15	> 15

Ref:34

CUADRO III-17

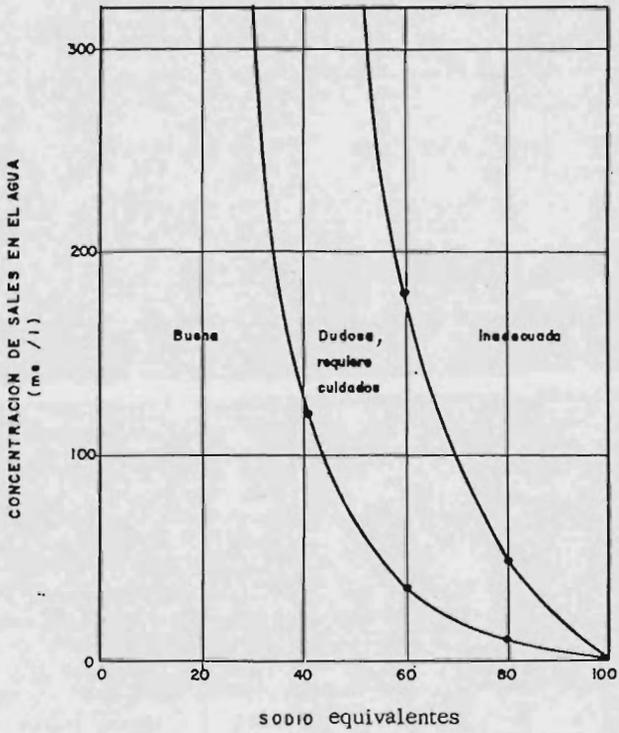
CLASIFICACION DEL AGUA DE RIEGO SEGUN

EL PORCIENTO DE SODIO POSIBLE

Condición del Suelo	PSP	Clasificación
Cualquiera	< 50%	Buena para riego
Suelos orgánicos o de textura ligera.	< 50% ó > 50% pero con menos de 10 me/l de sodio	Buena para riego
Suelos minerales de texturas medias o pesadas con menos de 4% de CaCO ₃ + Mg CO ₃	> 50%, con más de 10 me/l de sodio	Peligro de sodificación.

Ref: 34

CLASIFICACION DEL AGUA RESPECTO AL CONTENIDO
DE SODIO Y SALES



SP < 3 me/l
CSR < 1.25 me/l
B < 0.3 mg/l
Cl⁻ < 1 me/l

b) Aguas con más del 20% de CO₃⁼ + HCO₃⁻

CE < 250 mmhos/cm
SP < 3 me/l
CSR < 1.25 me/l
PSP < 50%
B < 0.3 mg/l
Cl⁻ < 1 me/l

- No recomendable. - El agua no se considera recomendable si uno o más índices rebasan los siguientes valores:

a) Aguas con menos del 20% de CO₃⁼ + HCO₃⁻

Clasificación C-4, S-1 y/o C-1, S-4

SP > 15 me/l
CSR > 2.5 me/l
B > 4 mg/l
Cl⁻ > 5 me/l

b) Aguas con más de 20% de CO₃⁼ + HCO₃⁻

SE > 15 me/l
SP > 15 me/l
CSR > 2.5 me/l
B > 4.0 mg/l
Cl⁻ > 5 me/l

- Condicionada. - Cuando los valores de los índices están comprendidos entre los extremos señalados

j) Sustancias tóxicas y metales pesados.

Se ha dado por llamar metales pesados al grupo de elementos: mercurio, cromo, cadmio, plomo, níquel, cobre, zinc, fierro, molibdeno, cobalto y posiblemente otros más. Estos elementos se presentan generalmente a nivel de "trazas" en la mayoría de las aguas superficiales, considerándose que si su concentración en agua es mayor de 0.01 mg/l, es síntoma de contaminación de origen industrial.⁽³³⁾ Algunos de estos elementos son -- constituyentes esenciales de la alimentación animal y vegetal y son requeridos en cantidades muy pequeñas, mostrando síntomas de toxicidad por acumulación en los tejidos.⁽³⁶⁾ Otras sustancias tóxicas encontradas en aguas residuales son los detergentes, plaguicidas, cianuro y arsénico entre otras. El incremento de plaguicidas organoclorados persistentes, por su excesiva aplicación y mal uso ha originado su presencia en nuestro medio, generalmente en aguas superficiales causando la muerte de peces y aves, deteriorando su alimentación y contaminando inclusive la del hombre. Su peligrosidad aumenta al ser muy resistentes a la degradación química y bioquímica por lo -- que grandes volúmenes de plaguicidas son arrastrados al mar con fatales consecuencias para su flora y fauna.⁽³⁷⁾

El promover en nuestro país la reutilización de aguas residuales en la agricultura presenta la incógnita de las alteraciones al ciclo normal de los plaguicidas que con esta práctica pudiera obtenerse, ignorando los efectos en forrajes y cultivos.

Contenidos máximos en agua de riego han sido propuestos por diversos autores, presentando en los cuadros III-18 a III-20, algunos de los límites permisibles más reconocidos.

CUADRO III- 18

CONCENTRACIONES MAXIMAS PERMISIBLES DE METALES
PESADOS EN AGUAS DE RIEGO

Elemento (mg/l)	Uso continuo	Uso esporádico
Aluminio	1	20
Arsénico	1	10
Berilio	0.5	1
Boro	0.75	2.1
Cadmio	0.005	0.05
Cromo	5	20
Cobalto	0.2	10
Cobre	0.2	5
Plomo	5.0	20
Manganeso	2.0	20
Níquel	0.005	0.05
Níquel	0.5	2
Selenio	0.05	0.05
Zinc	0.5	10

Ref: 33

CUADRO III-19

CONCENTRACIONES MAXIMAS PERMISIBLES DE ELEMENTOS

TOXICOS EN AGUAS DE RIEGO

Elemento	Para agua usada con tinuamente en todo tipo de suelo(mg/l)	Para agua usada en suelo de textura fi- na (mg/l)
Arsénico	1.0	10.0
Berilio	0.5	1.0
Boro	0.75	2.0
Cadmio	0.05	0.05
Cromo	5.0	20.0
Cobalto	0.2	10.0
Cobre	0.2	5.0
Plomo	5.0	20.0
Litio	5.0	5.0
Moblideno	0.005	0.05
Niquel	0.5	2.0
Vanadio	10.0	10.0
Zinc	5.0	10.0

Ref: 38

CUADRO III-20
LIMITES PERMISIBLES DE PLAGUICIDAS

Plaguicidas	Aguas * (S.R.H.)	Food and Drug Administration			
		Forrajes		Leches	
		(ppm)			
Heptacloro y Heptacloro epoxido	0.018	Alfalfa Cebollas Lechuga	- cero - cero - 0.1 ppm	Leche	- cero
Clordano	0.003	Cebollas Lechugas	- 0.3 ppm -	--	--
Malatión	0.100	Alfalfa	-135 ppm	Leche grasa Leche	- 0.5
Metoxicloro	0.035	Alfalfa Lechuga	- 100 ppm - 14 ppm	Leche	- cero
Paratión	0.100	Alfalfa Lechuga Cebollas	- 1 ppm - 1 ppm - 1 ppm	--	--
Lindano	0.056	Cebollas	- 1 ppm	--	--
Aldrin	0.017	Lechugas Alfalfa Cebollas	- 0.1 - cero - cero	--	--
Dieldrin	0.017	Cebollas	- 0.1 ppm	de 0.02 a 0.12 b	
Toxafeno	0.005	--	--	--	--
BHC	0.056	Lechuga Cebollas	- 1 ppm - 1 ppm	--	--
Herbicidas Totales	0.100	--	--	--	--
DDT	--	1 forraje de establo alimenticio - cero		cero	--
DDT, (DDD, DDE)	0.042			0.05	--

* Agua Potable y con tratamiento convencional
 Ref:12

k) Bacterias

En las aguas residuales son encontradas infinidad de organismos patógenos, algunos de los cuales muestran grandes períodos de supervivencia aún fuera de sus medios usuales, existiendo la posibilidad de contaminación de -- cultivos que se riegan con aguas residuales. A fin de evaluar los niveles de contaminación bacteriana, ha sido seleccionado el grupo de los coliformes fecales y totales dado que muestran un tiempo de supervivencia mayor que otros organismos altamente patógenos como la salmonela y schigella, siendo las pruebas requeridas para su identificación y conteo, rápidas y confiables. ⁽³⁹⁾

Considerando este índice de contaminación, la calidad de agua con fines de -- riego se considera adecuada, si el número más probable (NMP) de coliformes fecales es inferior a 1 000/100 ml cuando el aprovechamiento del agua es para irrigar hortalizas que se consuman sin hervir o frutos que tengan contacto con el suelo ⁽¹²⁾ quedando sin restricciones otros cultivos por no contar con estudios concluyentes. Los reglamentos comentados en las referencias - (28) y (29), especifican que el agua residual debe ser oxidada o tratada a nivel de tratamiento primario previamente a su aplicación en riego de forrajes, productos alimenticios que no se consuman crudos, jardines y plantas ornamentales requiriéndose la desinfección para el riego de otro tipo de cultivos, entendiéndose por desinfección cuando las aguas muestran una concentración bacteriana no mayor de 2 coliformes fecales en 100 ml.

III-2-2 Necesidades y Sistemas de Tratamiento.

El tratamiento de aguas residuales con fines de prácticas agrícolas está actualmente en etapas de investigación, ya que los reglamentos de reutilización en otros países, así como el propuesto por la CHCVM, ⁽³²⁾ indican tratamiento primario,

oxidación de las aguas y desinfección completa, dependiendo del tipo de cultivos, lo que representa una gran inversión considerando el gran volumen requerido para riego.

Tomando en cuenta las características promedio de las aguas residuales domésticas generadas en la República Mexicana (cuadro III-1) y en función de los límites permisibles es posible discurrir, preliminarmente, la necesidad de remoción de gran parte de los sólidos contenidos en el agua residual, así como de las grasas y aceites y bacterias coliformes, quedando a la expectativa los parámetros indicativos de la cantidad de materia orgánica (DBO y DQO) y de la cantidad de nutrientes (fósforo y nitrógeno), así como los detergentes, para los cuales ningún reglamento especifica concentraciones máximas tolerables en aguas de irrigación. Por otro lado, se mencionó anteriormente que debido a que los sistemas de drenaje municipales reciben aportaciones (en algunos casos considerables como en la Cd. de México) de efluentes industriales, es muy posible que las aguas presenten una gran concentración de sustancias tóxicas, que es menester removerlas a fin de tener una calidad de agua adecuada para riego y asegurar la ausencia de efectos nocivos tanto en el aspecto económico, (baja de productividad unitaria) como en el bienestar de la población que consume los productos agrícolas.

Considerando el volumen promedio de agua residual generado por ámbito de población, así como la cantidad de agua requerida para irrigar una hectárea durante un año, en función de la citada lámina promedio de 1.7 m en los distritos de riego nacionales, obtenemos la cantidad de hectáreas que es posible abrir al riego seguro con agua residual doméstica exclusivamente, mismas que re-

sultaron de 78, 275 Ha. Si se considera además el volúmen de agua residual generado por el sector industrial incluyendo generación de energía, las hectáreas factibles de abrirse al riego en total son: 215, 922 . Estas cifras pueden parecer a primera vista, muy reducidas, más debe tener en cuenta que dadas las experiencias actuales (Capítulo IV), el abrir zonas agrícolas con riego a base de agua residual redundará en incrementos de productividad unitaria de cultivos del orden del 30%, además de que es factible obtener hasta cuatro cosechas por año.

De los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales conocidos, ninguno es aplicable para su adaptación con fines de reuso en la agricultura, ya que los costos de tratamiento son demasiado elevados en función del valor promedio de la cosecha obtenida por hectárea y por año, y del gran volúmen de agua requerido.

Ante tal situación, es conveniente el considerar otras alternativas de tratamiento de aguas residuales, cuyo costo fuese adecuado para irrigación, encontrándose como alternativa viable, el proceso natural de tratamiento en lagunas facultativas con lirio acuático, mismo cuya eficiencia de remoción fué estudiada a nivel experimental reportando los resultados obtenidos en el apéndice A. ⁽¹³⁾ En base a dichos estudios se calculan los costos de tratamiento que pueden ser obtenidos empleando éste proceso, mismos que se presentan en el cuadro III-21 para varios ámbitos de población y caudales a tratar.

Las ventajas que éste proceso de tratamiento presenta son su bajo costo unitario, su adaptabilidad para todo tipo de aguas residuales, su aplicación a cualquier magnitud de caudal y su bajo costo de operación y mantenimiento, teniendo

do el atractivo de que el lirio cosechado puede industrializarse con fines de compostas y aún para complemento alimenticio pecuario. Sin embargo, también presenta el serio inconveniente de requerir de grandes superficies, siendo plausible el fomentar en presas derivadoras y vasos de contención el crecimiento de la flora acuática, a cambio de afectar completamente en dichas obras, otras actividades como la pesca y recreación.

III-3 Conclusiones.

- La calidad de agua requerida por la industria, considerando tanto los usos generales como en los diversos sectores industriales, no representa un impedimento para el aprovechamiento de aguas residuales domésticas ya que los sistemas de tratamiento propuestos muestran una gran eficiencia de remoción de contaminantes. Existen, sin embargo, algunas limitaciones, principalmente las derivadas por contaminantes coloidales causantes de turbiedad y color en las aguas y cuya remoción requiere de tratamientos costosos.
- La incorporación de efluentes industriales a los efluentes de origen doméstico redundaría en un incremento de los costos de depuración de aguas con fines de reuso debido a la aportación de contaminantes cuya remoción requiere de tratamiento terciario a base de precipitación química, ósmosis inversa u otros -
(13)
con altos costos de operación. Afortunadamente los organismos de prevención y control de contaminación de aguas en el país han fijado las llamadas condiciones particulares de descarga a fin de regular la masa de contaminantes máxima que una fuente contaminante vierta en los cuerpos receptores en función

CUADRO III-21

POTENCIAL DE RIEGO Y COSTOS DE TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL

Ambito de Población (hab)	No. de localidades.	Gasto Medio por localidad 1/seg	Áreas Irrigables potencialmente (Ha/año) (1)	Costo Unitario de tratamiento de aguas con lagunas de lirios (\$/Ha-año) (2)	Superficie requerida para cada sist. de trat. (Ha)
2 500 - 10 000	1 500	1.6	4 436	331	0.21
10 000 - 50 000	2 500	1.6	7 304	159	2.07
50 000 - 100 000	30	112	6 292	108	14.52
100 000 - 800 000	28	414	21 420	95	53.65
Distrito Federal	1	16 230	30 000	81	2 103
Guadalajara	1	3 017	5 588	85	391
Monterrey	1	1 733	3 235	86	225

Notas

- 1) Calculadas en función de una lámina de 1.7 m/año en cada hectárea y del volumen de agua residual generado.
- 2) Para la estimación del costo unitario de tratamiento se considera:
 - a) lagunas de lirio convencionales con un tiempo de retención de 3 días: relación largo-ancho de 2:1 y tirante de 2m..
 - b) la obra civil incluye únicamente: la escarificación superficial, el volumen de terraplén y el volumen de relleno, tomando precios actuales (1976).
 - c) se considera una vida útil de 20 años y no fueron incluidos los costos de recuperación del capital ya que este tipo de obras es de interés social.
 - d) no se consideran costos de operación ni mantenimiento ya que estos son aportados por los usuarios.

del uso a que está destinado el cuerpo de agua, con lo cual, la contaminación de aguas por fuentes industriales, se verá reducida en gran forma,⁽¹²⁾ promoviendo por otro lado la intensificación de las prácticas de reciclaje industrial interno.

- Las normas y limitaciones para clasificar el agua de riego consideran en general condiciones específicas de aprovechamiento como son aspectos climáticos, tipos de suelo y variedad de cultivos, principalmente, por lo que la factibilidad de su utilización debe ser determinada en función de estudios piloto a nivel de campo y/o laboratorio.
- Los sistemas de tratamiento convencionales para la depuración de agua residual con fines de irrigación, resultan demasiado costosos por el gran volumen requerido para riego. Sin embargo, es posible la adaptación de sistemas experimentales de tratamiento en lagunas con lirio acuático, mismas que proporcionan una calidad de agua adecuada para riego y su costo unitario es sumamente económico: en pequeños caudales, mediante la construcción de lagunas y, en grandes caudales, mediante la utilización de obras hidráulicas (presas derivadas, bordos y vasos de contención) donde pueda ser favorecida la proliferación de la flora acuática.
- Los volúmenes de agua residual generados en México no alcanzan a satisfacer totalmente los planes de expansión agrícola pretendidos, en función del aprovechamiento de esos caudales para la apertura de nuevas zonas con riego seguro. De cualquier forma su aprovechamiento proporciona una serie de beneficios imponderables tales como la liberación de caudales en el lugar de origen para sa-

tisfacen demandas prioritarias, incremento de productividad y valor de la propiedad de zonas de temporal, reducci3n de la contaminaci3n de aguas superficiales y posiblemente otras m3s.

El presente informe fue elaborado por el personal de la Oficina de Estudios y Estadística de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

CAPITULO IV

ESTUDIO PILOTO DE LA REUTILIZACION DE AGUAS RESIDUALES EN LA AGRICULTURA

IV-1 Introducción

El agua es un principio esencial para el desarrollo vegetal y es requerido en cantidades mucho mayores que los demás; pero en tanto que la planta retiene una gran parte de cualquier otro nutriente de los que absorbe, la característica sobresaliente del agua es su continuo flujo en una dirección⁽³⁵⁾. El suministro de agua afecta a la cantidad de elementos nutritivos absorbidos por la planta, pues a medida que es incrementado el volumen y frecuencia del riego, aumenta la absorción de minerales y nutrientes. Así mismo, el contenido de minerales en el agua de riego y la capacidad de ésta para disolver los existentes en el suelo, son factores decisivos en la nutrición de los cultivos. En estas condiciones, es posible suponer que la calidad del agua de riego influye determinantemente en las características de los suelos y cultivos alterando de alguna manera la calidad de éstos y sus condiciones naturales. Por otro lado, todos los suelos tienen un número de características comunes, pero individualmente cada uno de ellos difiere considerablemente, ya sea en su composición mineral y orgánica o en la distribución de estas fracciones en el perfil de suelo, dependiendo de las condiciones naturales en que se han desarro-

llado⁽⁴⁰⁾. De la misma manera, los cultivos y productos agrícolas presentan diferentes procesos metabólicos que los diferencian en función de la sensibilidad a determinadas sustancias tóxicas presentes en el agua de riego o en la solución del suelo (agua edáfica), existiendo algunas plantas en donde los elementos absorbidos, que no son necesarios para los procesos metabólicos, son eliminados de los tejidos activos y frecuentemente de la planta, al caer las hojas maduras;⁽³⁵⁾ sin embargo, no todos los vegetales poseen éste mecanismo de autodepuración, por lo que es posible que puedan presentarse acumulaciones de sustancias tóxicas en ciertos tejidos que induzcan una reducción de la productividad unitaria o lo que es peor, a perjudicar de manera definida a los animales o al hombre que se alimenta con ellas.

En tales condiciones, la evaluación de la posibilidad del aprovechamiento de agua residual en irrigación no es posible realizarla en función de su calidad únicamente, sino que es necesario referirla a determinadas condiciones particulares de suelos y cultivos desarrollados, a fin de determinar los efectos de la aplicación de aguas residuales en riego.

IV-2 Antecedentes y Metodología del Estudio

Existen en México algunas zonas de riego con agua residual entre las que se cuentan principalmente al Distrito de Riego 03, en Tula, Hgo.; el Distrito de Riego 88, en Chiconautla, Edo. de México, donde aprovechan, al igual que

en el DR-03, las aguas residuales conducidas por el Gran Canal de Desagüe de la Cd. de México; el ejido del Canadá, en el Edo. de N. León y el Valle de Cuernavaca, donde se aprovechan las aguas residuales del núcleo industrial CIVAC y cuyo caso particular cobra relevancia por los severos problemas de afectación agrícola.⁽⁴¹⁾

El aprovechamiento a gran escala de agua residual para irrigación en México data del año de 1900, año en que se terminó la construcción del Gran Canal de Desagüe de la Cd. de México⁽⁴²⁾. A través de éste sistema se procuró desfogar grandes volúmenes de agua residual, generados en la Cd. de México y zona metropolitana, hacia la cuenca del río Tula, en el estado de Hidalgo, y posteriormente hasta el Golfo de México, mediante su conducción por los ríos Moctezuma y Pánuco. Estas obras de ingeniería beneficiaron en gran forma a la zona árida del Valle del Mezquital, que vieron con ellas una fuente continua y de gran volumen de agua para el desarrollo e intensificación de las tradicionalmente estériles áreas de temporal.

En el año de 1946, con el inicio de operaciones de los Túneles de Tequixiac, construídos al final de los 45.5 kilómetros de recorrido del Gran Canal de Desagüe, se intensificaron las obras de habilitación del Distrito de Riego 03, mismo que a la fecha controla una superficie de más de 50 mil hectáreas de riego seguro con agua residual y que lo constituye en el más grande sistema de irrigación en su tipo en Latinoamérica y de los más importantes del mundo.⁽⁴³⁾

El aprovechamiento del recurso agua residual en el Distrito de Riego 03 ha permitido, entre otras cosas, incrementar la productividad unitaria de cultivos, en parte, por el hecho de contar con riego seguro durante todo el año, pero principalmente, por las excelentes cualidades fertilizantes que dichas aguas poseen, ya que las aguas de origen doméstico contienen concentraciones apreciables de nitrógeno y fósforo, además de otros micronutrientes esenciales a los cultivos.⁽⁴³⁾ Por otro lado, la incorporación de numerosas descargas industriales al sistema del Gran Canal de Desagüe, ha incrementado la concentración de metales pesados, sales y sustancias tóxicas, por lo que la bondad de aplicación de dichas aguas ha sido sujeta a estudios por parte de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, iniciando en el año de 1973, una serie de trabajos^(42, 43, 44) que continúan a la fecha, tendientes a definir los efectos y riesgos del aprovechamiento agrícola del recurso agua residual,

La metodología seguida en éste trabajo a evaluar los efectos de la aplicación del agua residual en riego parte de la recopilación y procesamiento de los resultados obtenidos en los programas de caracterización de muestras de agua, suelo, cultivos y leche, evaluando la aptitud teórica de un agua para su aprovechamiento en riego, lo cual no puede hacerse atendiendo exclusivamente a su calidad, por lo que fué necesario incluir un extenso trabajo bibliográfico sobre diagnóstico e interpretación de las características de suelos y cultivos así como recopilación de información sobre estadísticas de productividad agrícola y temas afines para poder evaluar amplia-

mente la excelente información vertida en los estudios mencionados.

IV-2-1 Descripción de la Zona de Estudio

El Distrito de Riego 03 (Fig. IV-1) se localiza en el estado de Hidalgo y ocupa una extensión aproximada de 50 000 Ha, de las cuales en 1974 se aprovecharon 49 799 Ha para el desarrollo de los siguientes cultivos: alfalfa, jitomate, calabacita, maíz, cebolla, ajo, chile y forrajes diversos como avena, trébol y cebada. El valor de la producción alcanza cifras superiores a los 385 millones de pesos anuales que se han visto paulatinamente incrementados con la apertura de nuevas secciones de riego⁽⁴⁴⁾. La zona estudiada tiene un clima semi-árido y suelos relativamente homogéneos con profundidades variables de 12 cm en las zonas altas, hasta 150 y 200 cm en las zonas bajas⁽⁴⁴⁾.

El área de influencia de la zona piloto incluye algunos núcleos de población entre los que se encuentran los siguientes:

Población	Hab	Población	Hab
Tula	38 685	Ixmiquilpan	15 000
Actopan	26 270	Tlaxcoapan	10 498
Tepeji del Rfo	24 107	Progreso	9 000
Mixquiahuala	22 484	Tasquillo	4 000

Para la operación del distrito se divide la superficie agrícola en secciones de riego que a la fecha suman 56 secciones de aproximadamente 1000 Ha de

extensión, siendo controladas, individualmente, en cuanto a la calidad y cantidad del agua de riego, tipo de suelo y productividad de cultivos, mediante laboratorio de análisis fisicoquímicos y departamento de estadísticas en las oficinas centrales de Mixquiahuala, Hgo.

La operación hidráulica del DR-03 está prácticamente sujeta al aprovechamiento de las aguas de los ríos Tepeji, El Salto y Salado, que son controlados mediante la operación de las presas Requena, Endho y Tlamaco respectivamente. La calidad del agua que presentan dichas fuentes de abastecimiento difiere considerablemente, ya que el río Tepeji conduce aguas de escurrimiento pluvial y descargas de aguas residuales domésticas de pequeñas poblaciones, regulándose en la Presa Requena su distribución, con tiempos de retención bajos debido a la especial conformación batimétrica del vaso; en cambio, el río El Salto, además de conducir los escurrimientos pluviales provenientes de la Cd. de México a través del río Cuauhtitlán y del Tajo de Nochistongo, recoge las descargas del Emisor Profundo y de las poblaciones de Jasso y Tula para formar luego el río Tula que recibe a su vez incorporaciones de los ríos Tlautla y Rosas, entrando finalmente a la Presa Endho, actualmente con un alto grado de eutrificación. Finalmente, el río Salado que es el cuerpo receptor del Gran Canal de Desagüe, conduce el agua residual combinada generada en la zona metropolitana de la Cd. de México.

En las mencionadas presas inician respectivamente su recorrido los canales

de riego: Principal Requena, con una extensión de 90 Km aproximadamente y una capacidad de $10 \text{ m}^3/\text{seg}$; el canal Principal Endho con aproximadamente 65 Km de extensión y una capacidad de $10 \text{ m}^3/\text{seg}$; finalmente, en la presa Tlamaco se inician los canales Tlamaco-Juandho que alimenta a la planta hidroeléctrica del mismo nombre, teniendo una capacidad de $15 \text{ m}^3/\text{seg}$ y el canal Principal Dendho, con una capacidad de $17 \text{ m}^3/\text{seg}$, derivando los excedentes por el mismo cauce del río Salado que se incorpora al Río Tula a la altura de la ciudad de Mixquiahuala, Hgo.

Estos canales principales forman el esqueleto hidrológico del distrito, partiendo de ellos una serie de canales laterales y secundarios con una extensión de 207 Km aproximadamente, siendo constantemente diseñados nuevos canales secundarios para satisfacer el riego de nuevas zonas agrícolas.

Finalmente en la zona baja del DR-03, misma que comprende las secciones de riego 1 a 15, aledañas a las poblaciones de San Salvador, Actopan, Bominza y Lagunillas, los canales de drenaje agrícola constituyen una importante fuente de abastecimiento de agua para riego, por lo que la inclusión de dichos canales de dren, dentro de la descripción del sistema hidrológico, es conducente.

Los volúmenes de agua excedentes de la utilización agrícola en el DR-03, así como aguas de retorno, sobrerriego y efluentes municipales descargados en diversos canales, confluyen invariablemente al río Tula nuevamente, con-

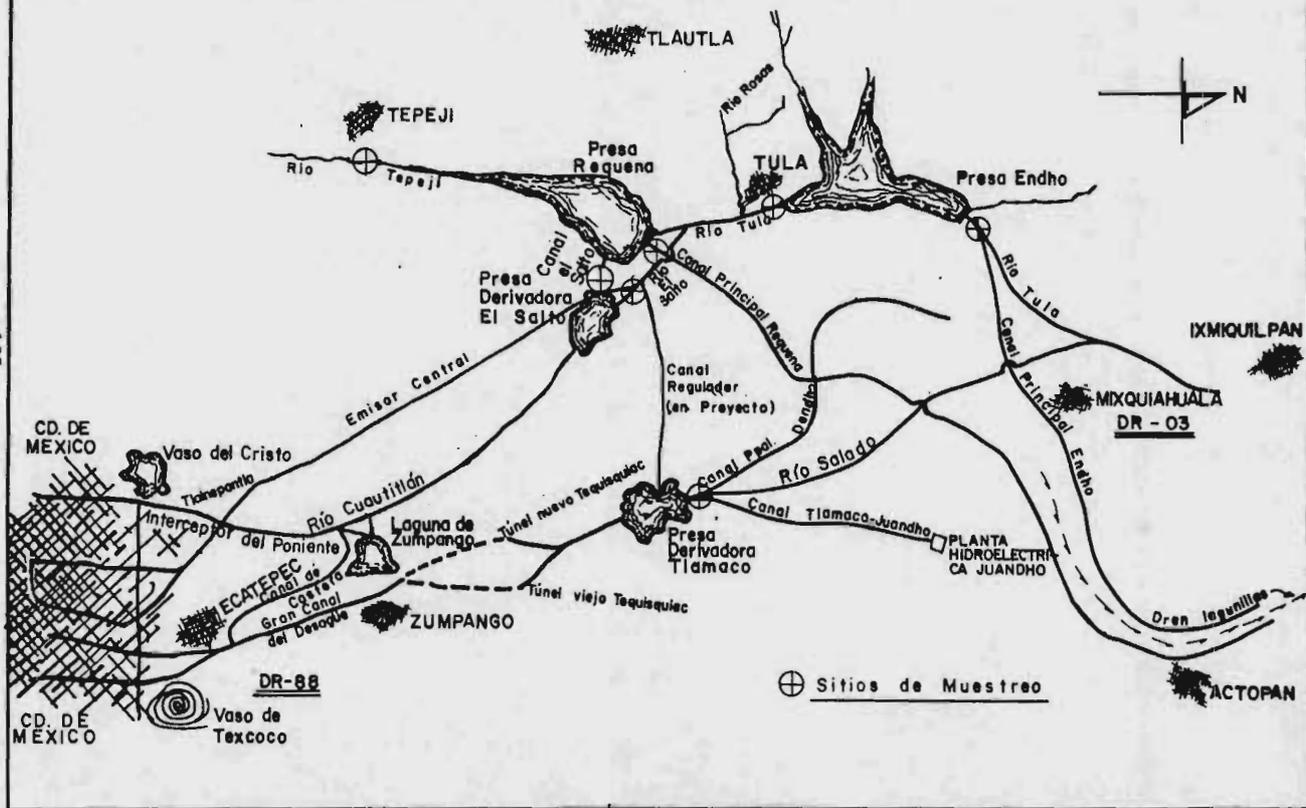
siderándose para los fines del presente estudio que a la altura de la población de Ixmiquilpan, Hgo., el ciclo de reutilización agrícola en el Distrito de Riego 03 culmina. La ilustración de lo descrito anteriormente se presenta en la figura IV-2.

IV-2-2 Programa de Caracterización

Al considerar los cuatro tipos de agua mencionados anteriormente, se inicia el muestreo de las aguas de riego, seleccionando para ello, los sitios de muestreo incluidos en la figura IV-3, con objeto de tener bajo control el agua utilizada en las distintas zonas del distrito, pudiendo referir su calidad con las condiciones del suelo y los cultivos. La periodicidad de los muestreos de agua en dichos sitios ha sido mensual desde el año de 1968 a la fecha, tanto por parte del Distrito de Riego 03 como a través de distintos estudios, habiéndose encontrado necesario la realización de programas especiales de caracterización en las fuentes de agua residual (negras) y de escurrimiento pluvial (blancas) por las siguientes razones:

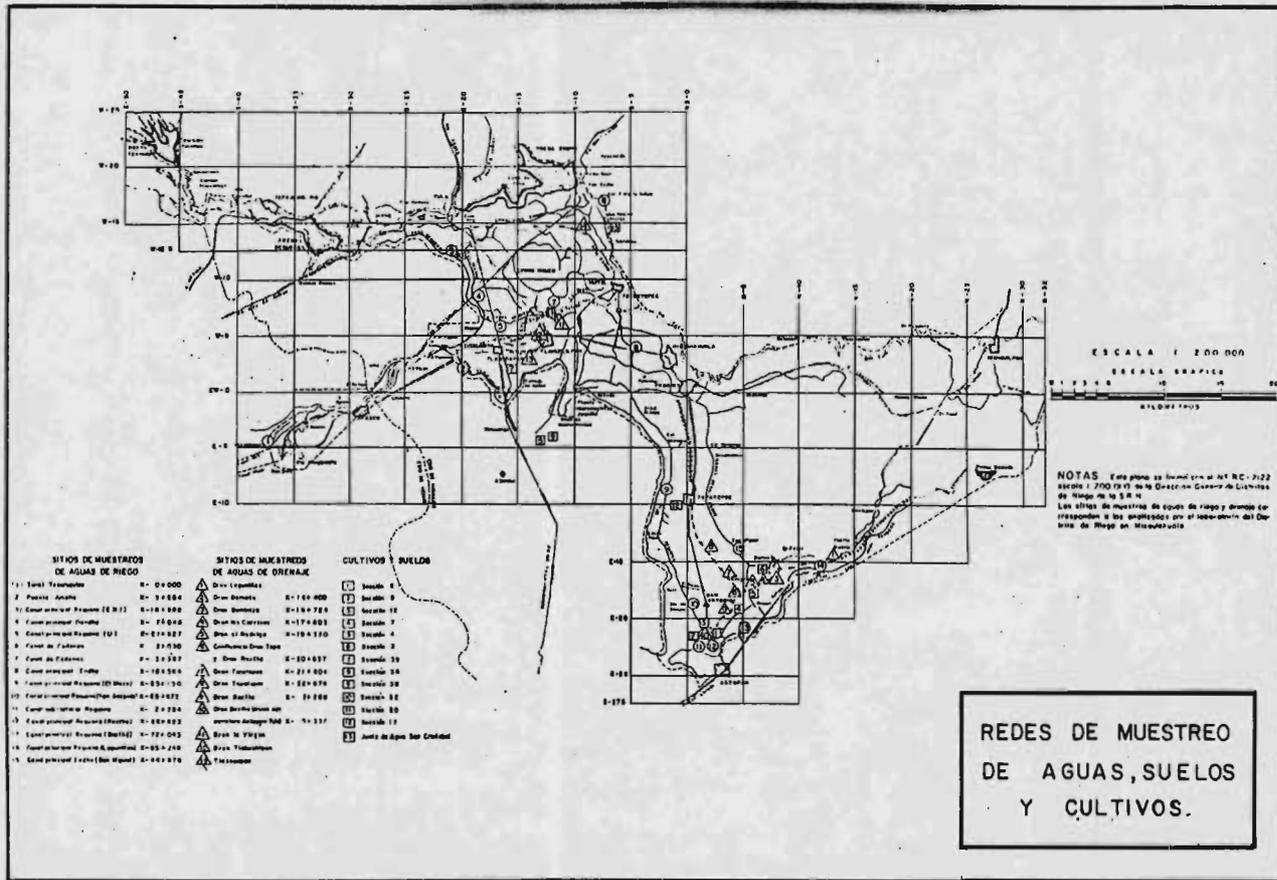
a) En el Gran Canal de Desagüe, que es la principal fuente de abastecimiento de agua residual para riego en el distrito, se ha observado una alteración paulatina de la calidad del agua conducida merced a la incorporación, principalmente en los 12 últimos años, de efluentes industriales altamente contaminados, lo que hace que, conforme avanza en su recorrido el cuerpo de agua, la calidad de ésta se deteriore y no sea homogénea, ni a lo largo del sistema, ni en diferentes épocas del año⁽⁴⁵⁾. Dichas fuentes de varia-

CROQUIS DEL SISTEMA HIDROLOGICO DEL DR-03



-125-

FIG. II-2



ción han sido visualizadas y ponderadas mediante la realización de muestreos intensivos en diferentes épocas del año y en distintos puntos del sistema, evaluando los resultados obtenidos mediante un procesamiento conocido como "Índices Objetivos de Calidad"⁽⁴⁶⁾, mismo que desarrollado sistemáticamente en base a información consistente, pueden proporcionar un criterio de los procesos dinámicos que rigen el comportamiento de los contaminantes en el agua, estimando de una manera general, el grado de autodepuración de ésta durante el recorrido en canales abiertos, aspecto de suma importancia en el rubro de reutilización agrícola, ya que mediante tales procesos naturales, es posible abatir costos de tratamiento de agua con fines de reuso.

b) Las presas Requena y Endho son los dos grandes vasos de almacenamiento y distribución de agua de riego en el distrito y reciben en menor o mayor grado, aportaciones de agua residual (36% y 85% respectivamente, en función del volumen total captado)⁽⁴⁷⁾. Dichos sistemas pueden considerarse como inmensas lagunas facultativas de tratamiento de agua ^(48, 49), y más aún la presa Endho por la extensa flora acuática existente. En ambos casos el estudio de mecanismos autodepurativos del agua durante el paso por tales vasos de contención es de sumo interés, razón por la cual fueron planeados muestreos intensivos de caracterización del agua en la entrada y salida de dichas presas, evaluando el grado de autopurificación del agua de riego.

Para el estudio de los suelos, las autoridades del distrito han fijado una se-

rie de pozos de observación localizados en los vértices de una cuadrícula de 1000 m, disponiéndose de información sobre las características fisicoquímicas de los suelos de casi la totalidad de las secciones de riego y muy especialmente de aquellas representativas del aprovechamiento de cada una de las calidades de agua de riego antes mencionadas.

En las mismas secciones de muestreo de suelos fueron llevados a cabo los muestreos de cultivos como alfalfa, jitomate, calabacita, principalmente, además de algunos forrajes y cultivos diversos para determinar el nivel de contaminación de éstos por bacterias, metales pesados y plaguicidas.

Los rendimientos unitarios de cultivos son de importancia para evaluar de una manera general, la influencia del agua de riego, siempre y cuando sean ponderadas ciertas variables como calidades de semilla, prácticas agrícolas, laboreo, clima, frecuencia de riego, etc, siendo ellas muy uniformes dentro del distrito, lo cual permite establecer comparaciones suficientemente confiables. Al respecto, la oficina de estadísticas del distrito lleva control sobre la productividad unitaria de los cultivos desarrollados en cada sección del mismo, procesándose a nivel de promedio las cifras de productividad para los últimos cuatro ciclos agrícolas, de los cultivos de mayor importancia económica en la región.

Por otro lado, fueron caracterizadas muestras de agua de abrevadero, forrajes y leche de vaca, de establos localizados en zonas abastecedoras de fo-

rrajes regados con cada una de las calidades de agua mencionadas, además de los procedentes de una zona testigo supuestamente sin contaminación, a fin de tener un contraste en la evaluación de los resultados.

La caracterización de todos los tipos de muestras mencionados permite realizar una evaluación integral del ciclo agrícola como una cadena ecológica pudiendo detectarse fácilmente cualquier mecanismo de transposición de contaminantes entre las fases intermedias y evaluar, en última instancia, la magnitud de los efectos de la reutilización del agua residual en irrigación.

IV-2-3 Técnicas Analíticas.

Al conjuntar la evaluación de la calidad del agua para reutilización desde el punto de vista de su calidad sanitaria y agronómica, es necesario recurrir a índices y criterios de calidad muy diferentes, ya que desde el punto de vista sanitario tienen especial importancia la presencia de contaminantes orgánicos y biológicos, en tanto que éstos son de importancia secundaria desde el punto de vista agronómico, donde la presencia de sales inorgánicas en exceso es fundamental para dictaminar la aptitud de un agua de riego⁽⁵¹⁾.

Tratando de cubrir ambos aspectos fueron seleccionados una serie de parámetros indicativos de calidad de agua, mismos que pueden ser desglosados de la siguiente forma:

Concepto	Parámetro	Agua	Suelo	Cultivo
Pruebas Rutinarias	pH	x	x	
	Temp	x		
	C.E.	x	x	
	Materia Orgánica (% o como DBO)	x	x	
	SDT	x		
	Textura		x	
Pruebas de Salinidad	Cationes Solubles (Ca ⁺⁺ , Mg ⁺⁺ , Na ⁺ , K ⁺)	x	x	
	Aniones Solubles (CO ₃ [■] , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ [■] , Cl ⁻)	x	x	
Pruebas de Fertilidad	Macronutrientes N ₂	x	x	
	Fósforo	x	x	
	K ⁺	x	x	
	Micronutrientes Mn ⁺⁺	x	x	
	Fe ⁺⁺	x	x	
	B ⁺	x	x	
	Cu ⁺⁺	x	x	
	Zn ⁺⁺	x	x	
Pruebas Especiales	Sustancias Tóxicas SAAM, CN ⁻ , As ⁺⁺⁺	x	x	
	Plaguicidas organoclorados	x		x
	Metales Pesados (Hg ⁺⁺ , Pb ⁺⁺ , Cr ⁶⁺ , Cd ⁺⁺ , Ni ⁺⁺)	x	x	
	Coliformes Fecales	x		x

Los técnicas de determinación rutinarias y bacteriológicas en aguas, fueron las recomendadas en los métodos normales para el análisis de aguas y aguas de desecho⁽³⁹⁾. Para suelos, se presenta en el cuadro IV-1, un resumen de las técnicas empleadas^(52,53,54,55); mismas que requieren una previa preparación de un extracto obtenido por filtración de una pasta de suelo en estado de saturación. En análisis especiales de metales pesados se aprovecha el equipo de absorción atómica instalado en el CIECCA correspondiente al espectrofotómetro Perkin-Elmer, Modelo 403 y siguiendo las técnicas del manual del propio equipo, tanto para la preparación de las

CUADRO IV-1

ANALISIS RUTINARIOS EN SUELOS

Determinación	Método Empleado
Textura	del Hidrómetro. Escala del Departamento de Agricultura de los E. E. U. U.
C. E. del extracto de Sat.	Puente de Wheatstone de electrodos y lectura directa.
pH	Titulación potenciométrica del extracto usando electrodo de vidrio.
% Materia Orgánica	Método de Walkley - Black modificado.
$N_2^- NO_3$ (NO_3^-)	Método colorimétrico de Morgan con di-fenilamina.
$N_2 NH_3$ (NH_4^+)	Método colorimétrico de Morgan con reactivos de Nessler.
Fósforo (P^{5+})	Método colorimétrico de Morgan con molibdato de sodio.
Potasio (K^+)	Método colorimétrico de Morgan con cobaltonitrito de sodio.
Calcio (Ca^{++})	Método colorimétrico de Morgan con oxalato de calcio.
Magnesio (Mg^{++})	Método colorimétrico de Morgan con Thiazol y NaOH.
Manganeso (Mn^{++})	Método colorimétrico de Morgan.
Cationes solubles: Ca^{++} + Mg^{++}	Titulación potenciométrica con EDTA.
Na^+ y K^+	Por Flamometría.
Aniones solubles: $CO_3^{--} HCO_3^-$	Titulación con H_2SO_4
SO_4^{--}	Método gravimétrico.
Cl^-	Método de Mohr.

muestras y extractos como para su cuantificación.

Los exámenes bacteriológicos en aguas y cultivos fueron realizados mediante la técnica de los tubos múltiples de fermentación, usando caldo lactosado en la prueba presuntiva y caldo lactosado y ácido bórico en la prueba confirmativa. Los cultivos requirieron la preparación de un licuado con agua destilada.

Para la determinación de plaguicidas organoclorados se emplearon técnicas de cromatografía de gas con detección por captura de electrones, usando el equipo Hewlett-Packard modelo 7620-A, preparando soluciones patrón, muestras y cuantificando de acuerdo a las instrucciones de manejo del propio equipo.

IV-3 Discusión de Resultados

La totalidad de los resultados obtenidos en los estudios sobre reuso del agua en la agricultura fueron agrupados por tipo de agua y procesados a nivel de promedio a fin de tener calidades representativas. Esta agrupación incluye a suelos y cultivos y se ha particularizado, para su fácil evaluación, en cuatro rubros generales que son: fertilidad, salinidad, metales pesados y sustancias tóxicas y finalmente aspectos bacteriológicos.

IV-3-1 Fertilización

Al hablar del agua residual como recurso hidráulico aplicable a la irrigación de zonas agrícolas, resulta de gran interés evaluar el beneficio que dichas prácticas implican, pues es sabido que el agua residual puramente doméstica contiene cantidades apreciables de ciertos elementos que son considerados nutrientes de cultivos, como lo son el nitrógeno, fósforo y potasio⁽⁵⁶⁾. Así mismo, las aguas residuales industriales arrastran entre otros, a los elementos hierro, boro, manganeso, cobre, etc., producto de la contaminación del agua usada en los procesos productivos, mismos elementos que son considerados micronutrientes. Ahora bien, al tener ambos tipos de desechos combinados, es factible tener en un sólo cuerpo de agua a los nutrientes primarios ($N_2P^{5+}K^+$), y a los micronutrientes mencionados, que al ser incorporados a los suelos agrícolas, incrementan su fertilidad y consecuentemente el rendimiento de cultivos.

La evaluación presentada en ésta sección pretende cuantificar los beneficios que se desprenden del aprovechamiento del recurso agua residual en la agricultura, estimando la disponibilidad de nutrientes en los diferentes tipos de agua usados en riego, así como la aportación resultante a los suelos, las condiciones de fertilidad de éstos y los efectos en el rendimiento de cosechas.

Disponibilidad de nutrientes en aguas de irrigación

Los resultados de la caracterización de las aguas de irrigación en la zona piloto permite estimar los contenidos promedio de nutrientes por tipo de agua usada en riego; cuadro IV-2

CUADRO IV-2

CONCENTRACIONES DE NUTRIENTES POR CLASE

DE AGUA DE RIEGO (mg/l)

Nutrientes	Puramente Domésticas (Promedio en México) (a)	Negras (Gran Canal del Desagüe)	Mezcladas	Blancas
Primarios:				
Nitrógeno				
N_2Norg	18	6.9	6.60	2.73
N_2NH_3	24	10.1	7.73	3.27
N_2NO_3	-	0.17	0.93	0.43
Fósforo				
PO_4^{5-} tot.	21	26.24	13.81	5.93
Potasio		51.55	44.74	11.17
Micronutrientes				
Fe^{++}		2.75	2.65	0.74
Mn^{++}		0.18	0.29	0.05
B^+		1.31	1.14	0.24
Cu^{++}		0.19	0.12	0.28
Zn^{++}		0.54	0.36	0.03

(a) Ref.: Estudio sobre Sistemas Económicos de Tratamiento de Aguas Residuales, Adecuadas a las Condiciones Nacionales, Segunda Etapa, DGUAPC, SRH, 1975

Refiriendo los resultados presentados en el cuadro mencionado con el reglamento existente en México⁽¹²⁾, se encuentran únicamente restricciones para boro (máximo 2 mg/l); cobre (1 mg/l) y nutrientes primarios en cantidades tales que no provoquen hiperfertilización. La calidad de las aguas estudiadas en la zona piloto cumplen perfectamente éstas restricciones. Sin embargo, las cualidades fertilizantes de dichas aguas sólo pueden evaluarse mediante el cálculo de las aportaciones en Kg/Ha-año a los suelos, mismas que se presentan en el cuadro IV-3, para una lámina anual de riego de 2.10 metros que es la usual en la zona.

Las aportaciones de nutrientes incluidas en el cuadro IV-3, bien pueden satisfacer los requerimientos teóricos de micronutrientes por los cultivos mostrados en el cuadro B-3 del Apéndice B. En igualdad de condiciones se encuentran las aportaciones de fósforo y potasio, las cuales son capaces de suministrar las demandas de nutrientes del maíz y la alfalfa.

El aprovechamiento de micronutrientes está condicionado a las características de alcalinidad o acidez del suelo, siendo la última propicia para mantener a los cationes metálicos en solución, con posibilidades de absorción por el cultivo; la primera característica del suelo, conduce a fijar dichos cationes en las partículas del suelo sin perjuicio para el cultivo, disolviéndolos éstos conforme sean requeridos, bajo la suposición de formarse una zona ácida en la interfase raíz-suelo.

En la figura B-3 se presenta el ámbito del valor de pH de los suelos estudiados en forma esquemática y que toma en cuenta los mecanismos mencionados anteriormente a fin de evitar problemas de toxicidad.

CUADRO IV-3

APORTACIONES ANUALES DE NUTRIENTES POR LAS AGUAS

DE RIEGO APLICADAS EN EL DR-03

kg/ha-año

Lamina Anual de riego 2.10 mt

Nutrientes	Aguas Negras	Aguas Mezcladas	Aguas Blancas
N ₂ Norg	145	139	57
N ₂ NH ₃	212	162	69
N ₂ NO ₃	3.6	19.5	9.0
PO ₄ [≡] Tot.	551	290	124
K ⁺	1082	939	244
Fe ⁺⁺	58	56	15
Mn ⁺⁺	3.8	6.1	1.0
B ⁺	27.5	23.9	5.0
Cu ⁺⁺	4.0	2.5	5.9
Zn ⁺⁺	11.3	7.6	0.6
Cl ⁻	3872	3213	571

La fertilización en nuestro país no es aplicada en forma intensiva, lo cual conduce a la obtención de rendimientos bajos o modestos; ⁽¹⁰⁾ sin embargo, las aportaciones de potasio, fósforo y calcio, así como de micronutrientes por las aguas residuales, son óptimas, como lo indican los resultados de las pruebas de fertilidad mostrados en el cuadro IV-4; inclusive son considerados como muy ricos en el contenido de potasio y extra-ricos en fósforo y calcio. ⁽⁵⁴⁾

El rendimiento de los cultivos está limitado por la disponibilidad de nitrógeno, elemento nutritivo requerido en grandes cantidades, y que por éso, los suelos son generalmente incapaces de proporcionárselos a los cultivos, siendo necesario adicionarlo en forma de abono de cuadra, fertilizante nitrogenado o fórmulas nitrogenadas.

Las únicas formas químicas del nitrógeno que pueden ser aprovechadas por los cultivos son las amoniacales y principalmente en forma de nitrato, por lo que las aportaciones del cuadro IV-3, bien pueden parecer insuficientes de desconocerse el ciclo del nutriente en la naturaleza. fig IV-4. El nitrógeno contenido en la materia orgánica de las aguas residuales es transformado a formas oxidadas por el ataque bacteriano ⁽⁵⁷⁾, al igual que el nitrógeno amoniacal, que es una fase de dicha transformación, de tal forma que, tomando en cuenta la lixiviación y pérdidas de amoníaco gaseoso, es factible que la materia orgánica sea una fuente continua capaz de mantener la concentración de nitratos en la solución del suelo entre 0.5 y 1.0 mg/l, por un período de 35 a 45 días ⁽³⁸⁾, período entre riegos en el distrito 03.

El análisis comparativo de rendimientos promedio de cultivos regados con

CUADRO IV-4

CARACTERISTICAS PROMEDIO DE FERTILIDAD DE LOS SUELOS

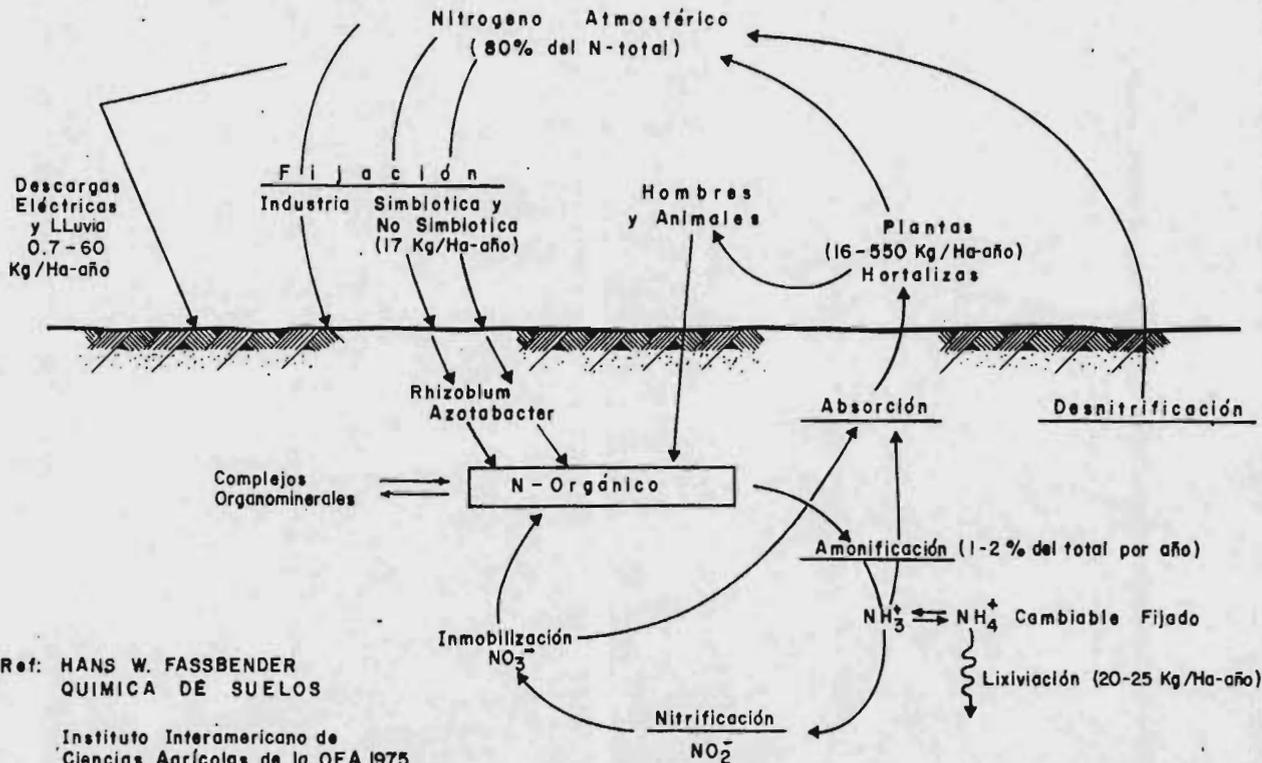
DEL DR-03

Parámetro	Concentración Promedio ⁽¹⁾ en Suelos Regados con Distinto Tipo de Agua									Concentra- ciones Óptimas 0-30
	Agua Negra			Agua Blanca			Agua Mezclada			
	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	
Profundidad (cm)										
pH	8.1	8.2	8.2	8.1	8.1	8.0	8.0	8.0	7.9	6.5
Materia Orgánica (%)	2.7	2.8	1.4	1.7	1.4	0.7	2.3	1.4	0.8	2.5 (2)
N ₂ -NO ₃ (Kg/Ha)	7.8	7.5	1.7	6.3	6.7	0.0	7.5	4.0	0.8	40
(3) N ₂ -NH ₃ (Kg/Ha)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Fósforo (Kg/Ha)	93	88	71	100	83	88	100	73	74	100
Potasio (Kg/Ha)	208	358	361	300	400	275	400	400	330	400
Calcio (Kg/Ha)	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
Magnesio (Kg/Ha)	12	9	13	11	10	8	12	8	7	50
Manganeso (kg/Ha)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	50
Cobre (mg/Kg)	0.8	0.3	0.3	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	2-100
Zinc (mg/Kg)	2.9	2.1	11.1	4.5	4.61	1.1	1.4	1.6	3.8	10-30
Hierro (mg/Kg)	8.5	2.2	2.2	11.8	7.9	2.7	1.6	1.2	1.1	1-5 %
Boro (mg/Kg)	0.4	0.5	0.2	0.1	0.3	0.1	0.5	0.3	0.2	2-100

Notas: 1) Promedio de 5 repeticiones
 3) Posible error analítico por pérdidas gaseosas

2) Contenido normal en suelos de textura similar
 4) Las concentraciones óptimas se refieren al contenido total en suelos

CICLO DEL NITROGENO EN LA NATURALEZA



Ref: HANS W. FASSBENDER
QUIMICA DE SUELOS

Instituto Interamericano de
Ciencias Agrícolas de la OEA 1975

FIG. IV-4

las tres clases de agua, incluido en el cuadro IV-5, presenta como variable la aportación de nitrógeno a los suelos por el agua de riego, y aún sin calcular medias significativas a cierto nivel de confianza, si permite definir el efecto de las aportaciones de nutrientes por las aguas residuales, beneficio que permite superar las limitantes que por el contenido de sales en dichas aguas, son impuestas a cultivos sensibles como el frijol. Por otro lado, los rendimientos mostrados en el cuadro IV-5, comparados a los obtenidos en más de 100 distritos de riego en la República Mexicana, corresponden a los máximos reportados por la Secretaría de Recursos Hidráulicos, según las estadísticas agrícolas de años recientes.⁽¹⁰⁾

IV-3-2 Salinidad

La zona piloto presenta condiciones de salinidad de suelos, exclusivamente en regiones donde se aprovecha agua residual en riego, lo cual motiva el incluir en el estudio, aspectos de salinidad, aunque las superficies afectadas a la fecha son mínimas respecto al área total del distrito; cuadro IV-6.

Los alcances logrados en el estudio de salinidad abarcan la caracterización de aguas de riego y de suelos regados con los distintos tipos de agua disponible.

La evaluación de la conveniencia o limitación del empleo de agua de riego, cualquiera que sea su clase, desde el punto de vista de salinidad, debe

CUADRO IV-5

RENDIMIENTOS AGRICOLAS EN EL DR-03 OBTENIDOS CON RIEGO
DE AGUAS NEGRAS, BLANCAS Y MEZCLADAS

Tipo de Agua de Riego y Cultivo		Rendimientos Unitarios Promedio (t/ha-ciclo)				
		1970-1971	1971-1972	1972-1973	1974-1975	Promedio
Negra	Alfalfa	91	88	85	82.4	86.6
	Maíz	2.7	3.2	3.6	4.3	3.5
	Jitomate	-	-	11.1	19.5	15.3
	Frijol	0.8	4.1	-	1.3	2.1
	Avena	-	14.6	19.0	17.3	17.0
Blanca	Alfalfa	74.7	78.2	85	78.1	79.0
	Maíz	1.6	2.3	2.8	3.5	2.6
	Jitomate	-	-	-	17.8	17.8
	Frijol	1.9	1.5	-	1.2	1.5
	Avena	-	9.0	16.0	17	14.0
Mezclada	Alfalfa	97.2	90.5	89.4	87.6	91.2
	Maíz	3.2	3.6	3.9	4.4	3.8
	Jitomate	-	-	23.3	20.7	22.0
	Frijol	2.1	2.8	-	1.5	2.1
	Avena	-	17.8	21.0	18.3	19.0

CUADRO IV-6

AREAS DEL DISTRITO DE RIEGO 03 AFECTADAS POR SALES

Magnitud de Afectación	Porcentaje
Libre de Sales	96.0 %
Ligeramente afectada	2.5 %
Medianamente afectada	0.5 %
Fuertemente afectada	0.2 %
Muy fuertemente afectada	0.14 %
Inundada	0.56 %
Sin aprovechamiento agrícola	<u>0.10</u> %
Total	100.0 %

(34)

atender los siguientes aspectos:

- a) contenido de sales solubles
- b) efecto probable del sodio sobre las características físicas del suelo y
- c) contenido de iones tóxicos para las plantas.

Atendiendo al contenido de cationes y aniones solubles, se presenta en el cuadro IV-7 los valores de índices de calidad calculados para los diferentes tipos de agua, sobre los cuales cabe hacer los siguientes comentarios:

Aguas Negras: Resultaron de las siguientes características,

Con más del 20% de $\text{CO}_3^- + \text{HCO}_3^-$
C. E. de 1845 $\mu\text{mhos/cm}$
S. E. de 15 me/l
Cloruros > 5 me/l
P. S. P > 50%
C. S. R. > 2.5 me/l

De acuerdo con los índices anteriores, el agua negra resulta inadecuada para aprovechamiento, de acuerdo con su salinidad efectiva; a uso condicionado, en función de la salinidad potencial y contenido de cloruros; inadecuada, de acuerdo a su porcentaje de sodio posible (PSP) y carbonato de sodio residual (CSR), por los altos peligros de sodificación.

Aguas Blancas: De acuerdo con su calidad, éstas aguas son excelentes para su aprovechamiento en riego, por no rebasar los valores indicados en el capítulo III, excepto por su porcentaje de sodio posible (PSP) de 81%, que condiciona su aplicación. El valor de conductividad eléctrica (CE) de 624 $\mu\text{mhos/cm}$: es aceptable; de igual modo, las concentraciones de boro y cloruros, que son respectivamente de 0.42 y 0.12 me/l.

CUADRO IV-7

PARAMETROS CALCULADOS PARA ANALIZAR LOS EFECTOS

DE SALINIDAD EN AGUAS DE RIEGO DEL DR-03

Parámetros	Valores Promedio por Tipo de Agua de Riego		
	Agua Negra	Agua Blanca	Agua Mezclada
Salinidad Efectiva (me/l)	19.1	1.77	9.71
Salinidad Potencial (me/l)	7.02	0.34	7.35
R A S	10.5	1.56	7.84
Na ₂ CO ₃ res (me/l)	10.54	1.21	4.00
% de Sodio Posible (%)	73	81	111
Suma de Cationes (me/l)	20.5	5.16	18.21
Suma de Aniones (me/l)	23.9	5.21	15.35

Aguas Mezcladas: Las características de éstas aguas resultaron las siguientes:

C. E	1766	μ mhos/cm
CSR	> 2.5	me/l
Cloruros	> 5.0	me/l
PSP	> 50	%
Boro	1.35	me/l
SE	9.7	me/l
SP	7.3	me/l

Estos índices presentan similitud con los de las aguas negras y de acuerdo con sus valores de CE y CSR, Cloruros y PSP, son aguas inadecuadas para el riego. En función del contenido de boro, SE y SP, se condiciona su empleo, por lo que en resumen, no es recomendable.

Las anteriores características de los tipos de agua negra y mezclada representarían un grave problema para los suelos por la afectación de sales y sodio a lo sumo después de 10 años de aplicación. Sin embargo, esto no ha causado problema en más del 3% de la superficie en que se aplican las aguas para riego, lo que conduce a establecer que el aprovechamiento de las aguas no puede condicionarse exclusivamente en función de sus características, sino con la ayuda de éstas, deben ser controladas otras variables, que para el sistema agua-suelo-cultivo, resultan de vital interés las siguientes:

- a) Infraestructura del suelo: nivelación, obras de drenaje, nivel freático, manejo y geomorfología.
- b) Selección de Cultivos: sensibilidad relativa y tolerancia a las sales, sodio, e iones tóxicos.
- c) Aplicación de riegos y clima: láminas de sobrerriego y lavado; evapo-

transpiración y precipitación.

Los parámetros de calidad de las aguas de riego consideran, en general, condiciones típicas de aprovechamiento agrícola. Sin embargo, el empleo de aguas residuales crea una situación especial, para la cual, dichos límites no son completamente aplicables si se considera que en las zonas de reutilización se usan, por ejemplo, láminas de riego y lavado excepcionales de 2.10 m/año, y una estricta selección de cultivos altamente tolerantes como alfalfa, maíz y jitomate. Por otra parte, los contenidos permisibles de sales en aguas de irrigación son aproximadamente cinco veces menores que en el extracto de saturación del suelo,⁽³⁴⁾ siendo en éste punto donde pueden causarse los problemas salinos. Ello da una idea de la flexibilidad de los límites permisibles sobre el contenido de sales, ya que en zonas de precipitación o riego intensos, la humedad del suelo no baja de las condiciones de saturación, siendo posible el uso de aguas con mayor contenido de sales que las concentraciones indicadas como inadecuadas, como ocurre en el Distrito de Riego 03.

El efecto de las sales solubles se debe a que producen presiones osmóticas en la solución del suelo que está en contacto con las raíces de las plantas, impidiendo la transposición de los elementos nutritivos a través de la raíz. Este efecto adverso puede ser prevenido o controlado, en el caso de tener aguas teóricamente inadecuadas, mediante prácticas agrícolas que equilibren el balance de sales. Aunque éstas prácticas representan en muchos casos fuertes inversiones, éstas son recuperables fácilmente mediante el ahorro en fertilizantes e incremento de productividad de cultivos.

Las aguas de riego estudiadas presentan restricciones por el contenido de sodio, medido a partir del RAS y el PSP. Al alcanzar el sodio proporciones mayores del 50%, con respecto a otros cationes disueltos, ya sea por acumulación directamente o por precipitación de calcio y magnesio de la solución del suelo, sustituye a éstos del complejo de intercambio, ocasionando un desequilibrio eléctrico en la miscela coloidal del suelo, en la que deja cargas negativas residuales provocando una repulsión entre ellas y, como consecuencia, el suelo se desflocula y pierde su estructura, disminuyendo la permeabilidad al aire y al agua.

Las grandes aportaciones de materia orgánica que reciben los suelos regados con aguas residuales, contrarrestan el efecto desfloculizante del exceso de sodio; éste mecanismo se ha llevado a cabo en forma natural en los suelos estudiados permitiendo así, el empleo de aguas teóricamente inadecuadas para riego.

IV-3-3 Metales Pesados y Sustancias Tóxicas.

En aguas superficiales, comúnmente se encuentran trazas de metales pesados, debido al arrastre y/o disolución de yacimientos minerales que el agua encuentra a su paso. Si alguno de los metales en el agua rebasa la concentración de 0.01 mg/l, puede suponerse fuentes extrañas de contaminación, preferentemente industrial, lo cual constituye motivo de preocupación por sus propiedades tóxicas o efectos adversos en las aguas receptoras. A continuación se presenta una breve descripción de las posibles fuentes generadoras de tal contaminación y el efecto específico de los metales pesados.

Manganeso:

El manganeso se utiliza para aleaciones y baterías, y además en la industria del vidrio, cerámica, pinturas y barnices, tintas, cerillos y fertilizantes. (33)

En soluciones nutrientes, se ha reportado tóxico para las plantas y su sensibilidad varía con las especies y la composición de la solución del suelo.

Mercurio:

Sus sales se utilizan extensamente en el comercio y en la industria como productos medicinales, desinfectantes, detonadores, pigmentos y en fotoes-tampado; la mayoría de sus sales son altamente solubles y se aceptan con-centraciones de 1.0 mg/l. (58)

Níquel:

Es utilizado en la industria electroquímica y se encuentra en suelos en forma insoluble; una acidificación de los suelos lo solubiliza causando daños a los cultivos, pudiendo ser extremadamente tóxico para los cítricos. Concen-traciones entre 15.9 y 29.4 mg/l de níquel en soluciones nutrientes resul-taron dañinos para la remolacha, tomate, papa y avena. (33)

Cobre:

Se utiliza en aleaciones, utensilios de cocina, industria eléctrica, tuberías, etc. Sus sales se emplean en procesos textiles, pigmentos, curtiduría, fo-tografía, electrodeposición, insecticidas y fungicidas. De encontrarse concen-traciones mayores de 0.05 mg/l sería índice de contaminación, pudiendo a-tribuirse a corrosión de tuberías o efluentes industriales. Concentraciones en soluciones nutrientes causaron efectos diversos en cultivos, a saber:

el crecimiento de la raíz de cebada resulta nulo para 1.0 mg/l como sulfato de cobre; se observó clorosis severa en avena para 10.0 mg/l como cobre; tóxico para remolacha y cebada en 0.2 mg/l y para el tomate a 2.0 mg/l. (59)

Plomo:

Los más importantes óxidos de plomo son monóxido de plomo, minio y dióxido, siendo los más usados en la industria, principalmente para la elaboración de vidrios, acumuladores, pinturas y aleaciones. Sus sales inorgánicas pueden ser tóxicas para las plantas porque, a concentraciones mayores de 5.0 mg/l de nitrato de plomo, en períodos de una semana de exposición, las plantas de avena y papa murieron, según observaciones realizadas. (59, 60)

Cromo:

Las sales de cromo se utilizan principalmente en electrodeposición, en la industria peletera, así como en disolventes, pinturas, cerámica y explosivos. No se tiene evidencia de que sea esencial para la nutrición de las plantas. El cromo se toma del suelo por las plantas y vegetales que crecen en suelos regados con aguas negras, reportándose concentraciones de 3 a 10 veces mayores que en vegetales cultivados bajo otros regímenes de riego. El dicromato de potasio agregado a una solución nutriente con 50 mg/l, redujo marcadamente el crecimiento de las plantas, causando ligera clorosis en los tejidos vegetales de la avena. (33)

Las aguas residuales empleadas en el Distrito de Riego 03, reciben en su recorrido descargas de efluentes industriales, resultando concentraciones

promedio de metales pesados de la magnitud mostrada en los cuadros IV-8 y IV-9, mismas que comparadas con las cifras de los cuadros III-18 y III-19, donde se exponen los límites permisibles, nos permiten visualizar cierto riesgo de afectación. Sin embargo, los contenidos a que hacen referencia tales límites son totales del elemento al estado metálico (reducido), no pudiendo distinguirse bajo que forma química se encuentran en el agua o en el suelo, aspecto de gran importancia, ya que algunos metales, como el mercurio, resulta excesivamente tóxica la forma mercúrica, y en cambio la mercuriosa, difiere considerablemente. En los suelos, el peligro de absorción por el cultivo está definido por el estado del ión metálico, pudiendo estar soluble en el agua edáfica, retenido en el complejo de intercambio del suelo o retenido firmemente en el suelo (fijo) formando algún compuesto mineral, siendo lo anterior sujeto a investigación actualmente. Los resultados disponibles son discutidos a continuación en forma independiente para cada catión metálico:

El contenido de plomo en aguas residuales es tres veces mayor que en agua blanca (0.05 mg/l) y para el uso agrícola los límites son muy amplios (5 a 20 mg/l). Los suelos presentan bajas concentraciones de plomo comparados con los contenidos normales de 10 a 100 ppm, marcando una evidencia acumulativa en los estratos superficiales donde se detectaron promedios de 3.08 ppm de plomo en suelos regados con agua negra.

Los valores detectados de mercurio en las aguas negras utilizadas en riego del distrito (0.002 mg/l), no presentan riesgo alguno, no rebasando siquiera, el límite de concentración para aguas potables, que es

CUADRO IV-8

CONCENTRACIONES PROMEDIO DE METALES PESADOS
Y SUSTANCIAS TOXICAS EN EL
AGUA DE RIEGO DEL DR-03

Parámetro	Concentración Promedio (mg/l) por tipo de Agua de Riego			Concentraciones Permisibles para Uso Agrícola. (1)
	Agua Negra	Agua Blanca	Agua Mezclada	
Mercurio	0.002	0.0005	0.002	0.01-1.0
Cromo	0.145	0.027	0.139	5.0
Cadmio	0.029	0.010	0.039	0.005
Plomo	0.161	0.047	0.130	5.0-20
Níquel	0.103	0.072	0.143	0.5-2.0
SAAM	8.36	2.52	6.08	Confuso
Arsénico	0.001	0.007	0.001	5.0
CN ⁻	0.75	-	1.0	0.2-1.0

(1) Según la Secretaría de Recursos Hidráulicos y la FWPCA.

CUADRO IV-9

CONCENTRACIONES PROMEDIO DE METALES PESADOS

EN SUELOS DEL DR-03

Parámetro	Concentración promedio (mg/kg) en suelos por tipo de calidad de agua de riego									Concentraciones Permisibles (mg/kg)	
	Agua Negra			Agua Blanca			Agua Mezclada			Normal	Límite
Profundidad (cm)	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90		
Mercurio	0.027	0.036	0.029	0.054	0.060	0.069	0.009	0.084	0.009	0.03-0.08	10
Cromo	0.602	0.342	0.375	0.28	0.30	0.23	0.32	0.32	0.31	8-1000	-
Cadmio	0.354	0.283	0.343	0.267	0.333	0.300	0.248	0.326	0.178	0.01-0.8	
Plomo	3.08	2.36	1.62	1.95	1.63	1.00	1.60	1.57	1.95	10-100	2000
Níquel	4.65	2.45	1.04	1.90	1.45	1.37	1.03	1.43	0.80	-	-

(12)

de 0.005 mg/l. Los suelos regados con aguas negras presentan inexplicablemente menor cantidad de mercurio que los regados con aguas blancas a pesar de que las aportaciones del elemento en los primeros son mayores. Según parece, los compuestos que forma éste elemento son muy solubles y son arrastrados fácilmente a los estratos inferiores por el agua percolante encontrándose en éstos, concentraciones de 0.03 y 0.08 ppm, ligeramente superiores a las cantidades encontradas en suelos normales.

Las concentraciones de cadmio encontradas en las aguas de riego, sobre todo en las mezcladas (0.04 mg/l), rebasan el límite permisible para aguas de uso agrícola, que indica un máximo de 0.005 mg/l. En cambio, otros reglamentos indican como límite la cifra de 0.05 mg/l, la cual no restringe el uso de éste tipo de aguas en el distrito 03. El cadmio presenta baja solubilidad en los suelos, fijándose en éstos sin perjuicio para los cultivos. Las concentraciones detectadas en los suelos regados con las tres clases de agua, nunca son superiores a 0.04 ppm, y son similares entre sí; el límite permisible para la presencia del elemento en suelos es de 100 ppm.

El cromo presenta gran semejanza con el plomo, tanto en lo referente a su concentración en aguas y suelos de la zona piloto como en los límites permisibles, por lo que es de suponer que su presencia en las aguas residuales del distrito no tenga mayor trascendencia.

Las concentraciones del resto de los metales pesados contenidos en las aguas de riego, son inferiores a los límites permisibles incluidos en los cuadros III-18 y III-19.

Respecto a los suelos, cabe hacer una observación general para todos los metales, y es que los límites permisibles de concentración sugeridos indican cantidad total del elemento en el suelo, siendo que el efecto adverso de los metales se presenta cuando éstos están en la solución del suelo, o sea, cuando están en condiciones de ser aprovechados por el cultivo.

Por otro lado, es de esperarse que las aguas utilizadas en riego en el distrito contengan cantidades detectables de algunos plaguicidas de uso doméstico, principalmente, mismas que son incrementadas por los residuos de plaguicidas agrícolas empleados en la zona y que son arrastrados por las aguas drenadas. Dichas aguas, ocasionalmente, son aprovechadas para el abrevadero del ganado, existiendo la posibilidad de contaminación por plaguicidas organoclorados en leche, dado que son acumulables en los tejidos grasos del animal y fácilmente arrastrados en tal producto. Varios autores sostienen que algunos compuestos orgánicos, posiblemente sin cambio alguno, han pasado del alimento del ganado a sus productos como leche y huevos, representando un riesgo para la alimentación de la población.(66)

Para el estudio de los anteriores aspectos se fija un programa de actividades dividido en tres etapas: en la primera y segunda se caracterizan muestras de agua, suelo, cultivos y leche del Distrito de Riego 03, mismas que proceden de áreas regadas con aguas negras y mezcladas. Posteriormente, en la tercera etapa, se toman muestras en la zona de Zoyatzingo, Mpio. de Amecameca, Edo. de México, considerando ésta, como una zona testigo donde el agua de riego supuestamente no deba de tener contaminación, ya que es producto del deshielo de los volcanes y sin ningún uso

anterior. La planeación de los sitios de muestreo tiene por objeto conocer si la contaminación por plaguicidas en forrajes y en leches es debida a la aplicación de aguas residuales que los contienen, o a otras causas específicas; para ello se colectan 11 muestras de agua de los tres tipos mencionados, quince de forrajes y cultivos, en sitios donde se aplican dichas aguas y quince de leche de vacas, muestreadas al azar, en establos donde se consumen los forrajes antes indicados.

Los valores obtenidos se presentan en forma desglosada por tipo de agua en el cuadro IV-10 para aguas, forrajes y leche, incluyéndose una recopilación de normas, tanto de la Secretaría de Recursos Hidráulicos y la Secretaría de Salubridad y Asistencia, como de la Food and Drug Administration (USA), sobre valores límites permisibles de plaguicidas, las cuales han sido usadas en la evaluación de los resultados experimentales obtenidos.

La contaminación por plaguicidas puede tener lugar en el aire, suelo, agua y biósfera, pero su característica particular es la movilidad que presenta; no puede hablarse de una contaminación particular, sino de puertas abiertas a la contaminación ya que ésta cambia continuamente de medio. La contaminación del agua puede tener dos orígenes: 1) directa, por el empleo de pesticidas destinados a higiene pública; 2) indirecta, por la movilización de contaminantes del aire y suelo (disposición de plaguicidas, arrastre por las aguas de lluvia y otros mecanismos. Esta contaminación debe separarse de las contaminaciones accidentales, pero puede alcanzar en ocasiones niveles riesgosos.

(62)

CUADRO IV- 10

CONCENTRACIONES DE PLAGUICIDAS ENCONTRADAS
EN AGUAS, FORRAJES Y LECHE

Plaguicida	Distrito de Riego 03, Tula, Hgo.						Zona Testigo: Zoyotzingo, Mpio. de Amecameca, Edo. de México			Concentraciones Máximas Permitidas		
	Agua (ppm x 10 ⁻³)		Forrajes		Leche		Agua (ppm x 10 ⁻³)	Forrajes	Leche	S. R. H.	Food & Drug Admon. USA.	Leche
	Negra	Mezclada	Negra	Mezclada	Negra	Mezclada						
Aldrin	20.2	1.318	0.020	trazas	0.0671	0.153				0.017	0	0
BHC α				0.0048				0.019	0.173	0.056		
BHC β								0.0033		0.056		
BHC γ	trazas	1.41	0.0048	0.0023			0.034	0.0072		0.056		
BHC δ	-									0.056		
Clordano	-									0.003		
Cloridano	-	0.005 < x < 0.04		trazas						0.003		
Cloridano	-									0.003		
Cloridano	-									0.003		
Dieldrin	-	0.003 < x < 0.01			0.872				0.014	0.017		0.012 a 0.02
Dieldrin	-											
Endosulfan I	-											
Endosulfan II	-											
Endosulfan	-											
Heptacloro	-									0.001		
Heptacloro-epóxido	0.0244									0.018	0	0
Micosiclolo										0.018	0	0
Mirex										0.035	100	0
p,p'DDE	0.0362							trazas		0.042	0	0.05
p,p'DDE										0.042	0	0.05
p,p'DDE	0.025 < x < 0.04	0.032						0.0073		0.042	0	0.05
p,p'DDE	0.270	0.0725	0.0073	0.0062		0.033		trazas	trazas	0.042	0	0.05
p,p'DDE	0.033	0.0231	0.0094	0.0029	0.0676	0.112		0.0056	0.142	0.042	0	0.05
p,p'DDE	-	0.003 < x < 0.01		0.0046		0.157		0.020	trazas	0.042	0	0.05
DDE	-									0.042	0	0
Teclorín	-											

Nota: En todas las muestras se analizaron los plaguicidas enlistados, habiéndose detectado únicamente los que presentan resultados.

En las aguas de riego del Distrito de Riego 03, se han encontrado valores de plaguicidas cercanos al límite permisible; concretamente para el tipo BHC (0.04 ppm); sin embargo, sus promedios generales por tipo de agua se encuentran muy por debajo del límite (0.056 ppm), a pesar de que las aguas presentan grandes fuentes de posible contaminación, como son las descargas de tres industrias productoras de plaguicidas ubicadas en el Edo, de México, donde es técnicamente factible que las aguas residuales de los distintos procesos de elaboración, arrastren cantidades de plaguicidas hacia el Gran Canal de Desagüe, incrementando así su concentración y por consiguiente, se detecten en las aguas de riego. Dichas industrias son: Diamond Química de México, S.A., ubicada en Xalostoc, con una producción anual de 900 Ton de DDT y 1000 Ton de BHC; Pennwalt de México, en Santa Clara, con 700 Ton de monoclorobenceno y 42 Ton de ortodiclorobenceno, además de 7 Ton de paradiclorobenceno; finalmente Poliquimia, en Xalostoc, con una producción global de 2250 Ton anuales de varios plaguicidas. (20)

Cabe hacer mención que los principales plaguicidas encontrados en el agua de riego, resultaron ser del mismo tipo que los elaborados en las industrias citadas (BHC e isómeros y el DDT y metabolitos), en concentraciones menores que los límites permisibles.

En el agua de la zona testigo se encuentra BHC (0.36×10^{-4} ppm), valor mínimo comparado con el límite permisible, pudiendo ser la causa el transporte aéreo, debido al exceso de aspersión y al pequeño tamaño de partícula de los plaguicidas. (63)

Los seres vivos contribuyen de modo poderoso a movilizar la contaminación y el ejemplo más claro de ello es el fenómeno de la "magnificación" en la escalada alimenticia de los seres vivos⁽⁶¹⁾. Aplicando ésto, el presente estudio se avocó a la evaluación de la magnitud de la transposición de los plaguicidas en el ciclo agua-forraje-leche, habiéndose determinado que los forrajes del DR-03 presentan concentraciones de 0.0128 ppm de metabolitos del DDT, cuando las normas marcan ausencia; en forrajes de la zona testigo, se detectaron cantidades hasta de 0.026 ppm, con promedio de 0.020 ppm, siendo éstas las más altas concentraciones encontradas en forrajes, cuando el agua de riego presentó ausencia del plaguicida.

El contenido de Aldrín (0.031 ppm) en cebolla irrigada con agua residual, rebasa la norma (ausencia), por estar clasificado como producto altamente tóxico, de uso peligroso y no aplicable en cultivos de legumbres.⁽⁶³⁾ El hecho de no encontrar el anterior tipo de plaguicida en el agua de riego empleada, confirma la no interacción en el ciclo agua-forraje-leche y permite detectar el mínimo control de expedición comercial e ignorancia de aplicación de éstos agentes químicos.

En leches se detectaron valores máximos promedio de 0.157 ppm de metabolitos del DDT en muestras procedentes del DR-03. En las muestras de la zona testigo se observan valores promedio máximos de 0.142 ppm del mismo plaguicida, cuando el límite permisible es de 0.05 ppm, confirmando una vez más que el agua de riego no influye en los contenidos de plaguicidas en leche, ya que no se detectó DDT en el agua de la zona testigo. Así mismo, el Dieldrín se presenta en leche de vacas que consumen

forraje regado con agua negra en valores de 0.148 a 2.24 ppm, cantidades muy superiores al límite permisible (0.125 ppm). En la zona testigo se determina Dieldrín en leche a una concentración de 0.014 ppm, no habiéndose detectado dicho plaguicida, ni en aguas de la zona testigo ni en el DR-03.

Teniendo valores de Dieldrín y DDT mayores que los permisibles en leche, es urgente tomar medidas de control ya que son considerados, especialmente el primero, como altamente tóxicos. Estos plaguicidas presentan una tendencia a acumularse en los organismos, especialmente en los tejidos grasos. Si su ingestión es repetida, incluso por debajo de las cantidades toleradas, pueden ocasionar serios trastornos a corto plazo, ya que presentan gran persistencia (más de 36 semanas para el DDT y más de 28 (63, 64) semanas el Dieldrín).

IV-3-4 Aspectos Bacteriológicos

Las aguas residuales son portadoras de altas cuentas bacterianas procedentes de las excretas humanas, de los escurrimientos pluviales y de efluentes de diversa índole como son establos, rastros, industrias alimenticias y de curtido de pieles. Al aplicar dichas aguas a labores agrícolas, se presenta un serio peligro de infecciones del personal de campo, que generalmente en nuestro país, realiza sus actividades sin protección alguna. Así mismo, suelos y cultivos están expuestos a ésta contaminación bacteriana,

problema que en México resulta de suma importancia, sobre todo a la luz de las altas cifras de mortandad por causa de enfermedades entéricas. Dada la importancia de los aspectos bacteriológicos, se caracteriza una amplia red de estaciones de muestreo de aguas de riego, sobre canales abiertos, vasos de irrigación y canales de irrigación. Las cifras obtenidas, Cuadro IV-11, rebasan considerablemente el límite permisible expresado en número más probable (NMP) de coliformes fecales que es de 1000/100 ml en aguas de uso agrícola ⁽¹²⁾, ya que cifras de 10^8 /100 ml se detectan en aguas negras y mezcladas, y de 10^4 /100 ml en aguas blancas.

La aplicación de agua de riego con las concentraciones indicadas en el cuadro IV-11, parece ser que no ocasiona la contaminación de cultivos como alfalfa, calabaza y jitomate, como lo confirman los resultados del cuadro IV-12. La explicación de ello es que en alfalfa, por ejemplo, los riegos son aplicados al corte, permitiéndole así un período de 40 días, tiempo suficiente para lograr una mortandad de bacterias depositadas por el agua de riego u otros medios ⁽⁶⁵⁾, alcanzando concentraciones de NMP coliformes fecales de 3 a 15 por 10 g en alfalfas regadas con los tres tipos de agua. Los otros cultivos, como el jitomate y la calabaza, con riegos más frecuentes (20 a 24 días), muestran el mismo margen de concentración.

Sin embargo, es factible que la contaminación de éste tipo de cultivos sea por medio de partículas de suelo que se depositan en la superficie por varias rutas (riego, insectos, aves, prácticas agrícolas, etc.), las cuales contienen gran cantidad de bacterias ⁽⁶⁶⁾, que al estar expuestas a condiciones adversas de temperatura o humedad, reducen las posibilidades de superviven-

CUADRO IV-11

CARACTERISTICAS BACTERIOLOGICAS DE LAS AGUAS DE RIEGO UTILIZADAS EN EL DR-03

<u>E s t a c i ó n</u>	<u>Tipo de Agua</u>	<u>NMP Coliformes Fecales/100 ml</u>
Gran Canal del Desagüe (Km 0+00)	Negra	9.1×10^6
Túnel de Tequiquiac (DR-03)	Negra	6.3×10^8
Entrada Presa Endho	Blanca	4.6×10^4
Salida Presa Endho	Blanca	1.1×10^6
Entrada Presa Requena	Blanca	2.4×10^5
Salida Presa Requena	Blanca	1.1×10^5
Canal Principal Requena (DR-03)	Blanca	2.1×10^3
Promedio Agua Mezcalda (DR-03)	Mezclada	4.0×10^9

CUADRO IV-12

CARACTERISTICAS BACTERIOLOGICAS DE ALGUNOS CULTIVOS DEL DR-03

REGADOS CON LAS DIFERENTES CLASES DE AGUA

<u>Caracterfsticas</u>	<u>Cultivo</u>	<u>Tipo de Riego</u>	<u>NMP Coliformes Fecales</u>	
			<u>Lav. Sup.</u>	<u>Sin Lav.</u>
Cultivos varios regados con los tres tipos de agua; riego reciente y sin lluvia (a)	Ajo	A. M.	16/10 g	-
	Avena	A. M.	3000/10 g	-
	Alfalfa	A. M.	93/10 g	-
	Cebolla	A. N.	53/10 g	-
Cultivos varios regados con los tres tipos de agua; último riego de 15 a 30 días antes del muestreo con lluvias recientes (b)	Jitomate	A. B.	3/Pieza	3/Pieza
	Alfalfa	A. B.	3/10 g	3/10 g
	Jitomate	A. M.	3/Pieza	3/Pieza
	Alfalfa	A. M.	15/10 g	15/10 g
	Alfalfa	A. N.	5/10 g	3/10 g
	Calabaza	A. N.	5/Pieza	3/Pieza

(a) El lavado de los cultivos se efectuó en solución de cloro al 7% o fenol al 0.5% en un minuto

(b) El lavado de los cultivos se efectuó con agua en forma directa de un grifo

cia, a menos que logren introducirse a los tejidos internos del vegetal por la existencia de poros o contusiones en la membrana superficial. Otro medio de contaminación, aún mayor que el del agua de riego, bien puede ser el lavado de los cultivos que se efectúa dentro de la recolección o en los centros de consumo (mercados)⁽⁶⁷⁾.

En resumen, los resultados obtenidos revelan, que a pesar de que las aguas de riego presentan niveles de contaminación bacteriana francamente riesgosos, los cultivos no resultan mayormente afectados, o en su caso, dicha contaminación no se traduce en riesgos directos al consumidor, por las altas tasas de mortandad de bacterias en la superficie de los cultivos. Sin embargo, éstos aspectos no son los únicos a considerar dentro del rubro, ya que existen una serie de riesgos de contaminación bacteriana en zonas de regadío con aguas residuales, tales como la infección del personal de campo que trabaja en contacto directo con aguas contaminadas, formación de focos de infección por desbordamiento de canales, infecciones del ganado por abrebar en canales de riego, etc, siendo todos ellos contemplados y normalizados dentro del reglamento de las referencias 28 y 29.

IV-3-5 Problemas Especiales de Afectación y Estudios de Autodepuración.

Se ha mencionado anteriormente que el aprovechamiento de agua residual para irrigación es factible, siempre y cuando sean contempladas diversas situaciones particulares de las zonas agrícolas en cuestión. Dado que en México, por su situación de país en vías de desarrollo, no se ha prestado

especial interés sobre ciertos rubros de la contaminación ambiental, han empezado a detectarse algunos problemas, en algunos casos de grandes dimensiones, derivados principalmente por la escasa difusión técnica que, en lo referente al tema que nos atañe, ha sido peligrosamente descuidada, en detrimento de la economía y salud de las zonas de regadío en el país.

Cobra relevancia el caso de afectación agrícola en el Valle de Cuernavaca, en el Edo. de Morelos⁽⁶⁸⁾, donde actualmente se aprovechan en irrigación, los efluentes industriales crudos de infinidad de industrias localizadas en la zona aledaña a la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca (CIVAC), siendo atribuible a tal reuso de aguas, disminución hasta en un 50% de la productividad unitaria de cultivos, además de infinidad de problemas secundarios y un creciente malestar de la población.

Los estudios realizados en la zona han contribuido a ampliar los criterios de evaluación sobre los aspectos a controlar dentro de las técnicas de reutilización agrícola⁽⁶⁸⁾.

Las aguas disponibles para irrigación en el Valle de Cuernavaca son las vertidas por las mencionadas industrias en las barrancas de la zona, siendo su calidad francamente objetable para usos agrícolas, por su elevada temperatura y contenido de sales en solución, además de su potencial hidrógeno francamente ácido; éstos factores, aunados a la textura ligera de los suelos y a los sensibles cultivos explotados, han conducido a severos problemas de afectación de los suelos y a una baja de productividad.

La solución al problema se plantea, llevándose actualmente la construcción de una planta de tratamiento de agua para depurar en conjunto, la totalidad de los efluentes contaminantes, obteniéndose una calidad apta para su aplicación en riego.

Por otro lado, en ciertas zonas de los distritos de riego 03 y 88, donde es aprovechada agua residual en riego, es atribuida a ésta un severo problema de ensalitramiento⁽⁶⁸⁾. Indudablemente el agua ha favorecido tal afectación, mas la causa determinante o directa es la dificultad de drenaje y nivelación en tales suelos, que conduce al acumulamiento de sales en los estratos superficiales donde, por evaporación, se concentran las soluciones salinas.

Problemas de contaminación bacteriana de cultivos se observan frecuentemente en el empleo de agua residual para riego de cultivos de superficie rugosa como las fresas, o de gran área foliar (forrajes, lechuga, col, perejil, etc.), o finalmente, cultivos que se desarrollan a ras de suelo como los tubérculos.

Respecto a los estudios de autodepuración llevados a cabo dentro de las actividades desarrolladas en la zona piloto, se menciona especialmente la investigación sobre la capacidad autopurificadora del Gran Canal de Desagüe. El programa de caracterización y el procesamiento estadístico aplicado en la evaluación permiten concluir que en el tramo inicial del sistema, debido a innumerables aportaciones de industrias localizadas en sus márgenes, el agua sufre una apreciable degradación en su calidad. Sin embargo, a partir del Km 27, el canal queda libre de descargas contaminantes hasta el Km 47+500, punto final del sistema como canal abierto, logrando, a través de

procesos de oxidación superficial, sedimentación, e incipiente tratamiento biológico, una tasa de autodepuración global (estimada en función de índices objetivos), superior al 17%, lo cual es alentador considerando el origen y calidad de los desechos vertidos. (68)

La autodepuración de las aguas en su paso por las presas Requena y Endho es, nula en el primer caso debido al reducido tiempo de permanencia y es caso mezclado que tienen las aguas; en cambio, en la presa Endho son observadas remociones promedio de contaminantes superiores a 50% para contaminantes de difícil remoción como detergentes, y hasta de 90 y 98% para contaminantes orgánicos, biológicos y nutrientes, merced a la flora acuática existente (lirio acuático)⁽⁶⁸⁾, lo cual confirma a escala real, la eficiencia de tales sistemas de tratamiento con fines de reuso en la agricultura.

IV-4 Conclusiones

- ° La aplicación de aguas residuales en suelos agrícolas del Distrito de Riego 03 redundará en un incremento de la fertilidad del suelo, especialmente en el contenido de los micronutrientes boro, zinc, hierro y cobre.
- ° Las aportaciones de nitrógeno, en formas no aprovechables por el cultivo (nitrógeno orgánico), constituyen una gran reserva de nitratos mediante oxidación bacteriana, favoreciendo el incremento de productividad de cultivos con altos requerimientos de nutrientes como el maíz, jitomate y alfalfa.

- ° La calidad del agua de riego rebasa los límites permisibles para uso agrícola en el aspecto de salinidad; sin embargo, los suelos no han sido mayormente afectados debido al especial manejo que reciben, a las láminas de riego y sobrerriego y muy especialmente al buen drenaje que éstos tienen. Las áreas afectadas se localizan invariablemente en zonas con problemas de nivelación y drenaje.
- ° Las aportaciones de materia orgánica a los suelos por la aplicación de aguas residuales en riego, ha mejorado sensible, aunque no significativamente, la constitución del perfil laborable, dando origen a un cambio de textura del suelo que permite una mayor facilidad de labores, un incremento en la capacidad de retención de elementos nutritivos una mayor capacidad de asimilación de sodio, contrarrestando sus efectos adversos.
- ° Las aportaciones de metales pesados a los suelos, por el uso de aguas residuales, al parecer no tiene influencia notoria debido a la gran capacidad amortiguadora de los mismos, notándose en suelos con 60 años de riego con tales aguas, niveles que van de un décimo a un centésimo de los límites permisibles en suelos.
- ° Es indudable que los elementos químicos siguen determinados mecanismos de transposición en la cadena alimenticia, ya que su presencia es indispensable para los procesos metabólicos de los organismos de los cuales son constituyentes en tránsito. En éstos mecanismos están involucrados, en mayor o menor grado, los macroelementos calcio, magnesio, potasio, fósforo y azufre, así como algunos elementos microponderables. En determinadas ocasiones, y debido a la especial riqueza de ciertos elementos en par-

ticular en cualquiera de las fases iniciales del ciclo agua-suelo-forraje-leche, se inducen acumulaciones indeseables de metales pesados y sustancias tóxicas, que son transportadas por diversas vías a las fases superiores del citado ciclo. Sobre el particular, han sido detectadas transposiciones indeseables y peligrosas de algunos elementos como cadmio y plomo; sin embargo, es difícil imputar dicha transposición a las prácticas de reuso agrícola de aguas residuales, ya que hay mecanismos que se presentan muy ajenos a las prácticas agrícolas y que redundan en peligrosas acumulaciones de dichos constituyentes en suelos y cultivos, ocasionando indudablemente, su transposición al ganado que consume éstos.

° El agua de riego no tiene influencia directa en la contaminación por plaguicidas organoclorados en forraje y leche de vaca, siendo imputable tal, a la escasa difusión técnica sobre el uso de plaguicidas y al mal control de distribución y venta, pues han sido detectados niveles peligrosos de plaguicidas en cultivos donde ciertos agentes químicos no deben ser aplicados, como el caso del Aldrin en cebollas de Cambray, no habiéndose detectado el mismo en el agua de riego. Casos similares discutidos en éste trabajo confirman que la única relación entre éste tipo de contaminación y el empleo de agua residual, es que ésta incita, por su contenido de nutrientes, al desarrollo de ciertas especies parásitas que es menester combatir las con plaguicidas, siendo su empleo indebido, el causante de encontrar concentraciones peligrosas en cultivos y hasta en leche de ganado que consume los forrajes contaminados.

- ° La calidad bacteriológica del agua de riego utilizada en el DR-03, rebasa los límites permisibles expresados en NMP de coliformes fecales igual a 1000/100 ml y NMP de coliformes totales de 5000/100ml, cualesquiera que sea el tipo de agua, blanca, mezclada o negra.
- ° Las concentraciones en NMP de coliformes fecales de 3 a 5/10g en los cultivos regados con los tres tipos de agua utilizados en el DR-03, permiten suponer que ésta no tiene influencia en la contaminación bacteriana de cultivos en el campo, o en su defecto, ésta es reducida por los efectos climáticos, pudiéndose presentar la contaminación en otras fases entre el campo y el consumidor, como lo son el lavado durante la cosecha, el transporte y su distribución hasta los centros de consumo.
- ° No se localizan normas específicas sobre el contenido máximo permisible de coliformes en cultivos; sin embargo, como referencia, se tienen resultados de experimentos recientes efectuados en cultivos de tomate en la zona de reutilización del Valle de Juárez, Chih., habiéndose determinado concentraciones en NMP Coli 900/100 g de cultivo, y una vez lavado, de NMP Coli de 1 a 5/100 g, para tomates regados con agua residual con 30 mg/l de DBO. Los resultados preliminares obtenidos en NMP coliformes fecales de 3 a 15/10 g en el desarrollo del estudio, no son definitivos, por haberse detectado cierto riesgo de contaminación en el laboratorio.
- ° Se han encontrado graves problemas de afectación agrícola por el empleo de agua residual en riego. Tal recurso no debe ser indiscriminadamente aprovechado, sino que éste debe realizarse en base a estudios simultáneos

de calidad de agua, características y condiciones de suelos y tolerancia de cultivos.

- ° Los procesos de autodepuración de agua residual en canales abiertos y presas derivadoras, deben ser contemplados en los proyectos de riego con agua residual ya que mejoran considerablemente, bajo ciertas condiciones, la calidad del agua disponible.

IV-5 Recomendaciones

Los estudios sobre el aprovechamiento del agua residual son incipientes en México y no han sido suficientemente difundidos, principalmente en los puntos conflictivos, como son el sector campesino y el de los centros de distribución, procesamiento y centros de consumo de los productos agropecuarios. Ello ha motivado un equivocado rechazo a tales técnicas de incremento de la producción, siendo recomendable la profundización de los estudios, especialmente en ciertos rubros donde persisten interrogantes cuya solución y difusión puede acabar con tan equivocado criterio de rechazo.

- ° Siendo los aspectos de contaminación bacteriana en zonas de riego con agua residual, los más importantes dentro de los estudios de reutilización, es recomendable la determinación de niveles de contaminación, tanto por los organismos aquí estudiados, para confirmación, como por otros organismos patógenos altamente peligrosos como lo son los quistes y amibas.

- ° Es recomendable extender los estudios para la detección de plaguicidas no solamente organoclorados, ya que en el mercado nacional existen otros tipos como los organofosforados, inorgánicos y carbámicos, algunos de ellos más tóxicos que los aquí estudiados. Así mismo, la normalización en su uso, el control de expedición y la sustitución por productos de más fácil degradación, son acciones recomendables para evitar tan peligrosa contaminación y sólo puede hacerse mediante la integración de esfuerzos interdisciplinarios.

- ° La selección de la zona piloto del Distrito de Riego 03 para el estudio de los efectos del aprovechamiento del agua residual resulta de gran importancia ya que las aguas ahí utilizadas pueden suponerse como las de más baja calidad en el país, por contener las aportaciones industriales de una zona donde están concentradas más del 50% de la capacidad industrial nacional. Sin embargo, existen muchos tipos de agua residual y sus efectos de aprovechamiento agrícola no pueden ser inferidos en base a estudios teóricos, sino que deben contemplarse ciertas acciones de control para la correcta utilización del recurso en otras zonas de reuso. Ellas pueden resumirse en las presentadas en el cuadro IV-13.

CUADRO IV-13

CARACTERÍSTICAS DE CONTROL PARA AGUAS RESIDUALES

EMPLEADAS EN RIEGO

Tipo de Agua	Salinidad	pH y Temperatura	Nutrientes	Micro Nutrientes	Metales y Sust. Tóxicas	Observaciones
Residual Industrial	Pretratamiento de efluentes con C. E. 2500 mhos/cm	Indispensable control y ajuste a condiciones óptimas. Uso D-III	Beneficio condicionado a la acidez del agua pH óptimo = 6.5	Beneficio condicionado a la acidez del suelo	Control eventual en efluentes de Industrias polutivas, Hg, Cr, Cd, Pb, Mo	En algunos efluentes ocurren sobreconcentraciones de nutrientes que deben ser removidos
Residual Doméstica	Adecuada para cultivos semitolerantes	Sin problemas	Aportaciones benéficas para cultivos con grandes requerimientos	Aportaciones benéficas	Control de SAAM y plaguicidas domésticos en abundancia	Control sanitario de la zona de aprovechamiento para evitar infecciones bacterianas
Residual Combinada	Adecuada para cultivos semitolerantes. Drenaje agrícola eficiente	Sin problemas	En suelos pobres aportaciones benéficas. En suelo fértil control de hiperfertilización	Control de boro, molibdeno y manganeso	Control de efluentes industriales con aportación de CN, As, Cd y Cr	Pretratamiento económico en vasos de retención y presas decantadoras con lirio acuático. Control bacteriano
De Retorno Agrícola	Control eventual del lixiviado excesivo de iones salinos	Sin problemas	Aportaciones modestas	Control de micronutrientes solubles arrastrados en exceso	Control de As y residuos de plaguicidas	Conveniente la mezcla con aguas de sobrierriego y de primera calidad para obtener diluciones salinas

APENDICE A
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
CON LIRIO ACUATICO

A-1 Antecedentes.

El lirio acuático ha sido tradicionalmente considerado en México como una plaga que afecta numerosos cuerpos de agua en las regiones tropicales del país; sin embargo, estudios experimentales realizados en otros países han descubierto una capacidad realmente asombrosa del lirio acuático para remover contaminantes de las aguas residuales. El potencial de éste tipo de tratamiento es evidente en base a la información disponible a la fecha, y todo permite suponer que éste revolucionario sistema de tratamiento ofrecen grandes atractivos técnicos y económicos en numerosas comunidades de nuestro país.

El sistema de tratamiento de aguas residuales con lirio acuático consta esencialmente de una laguna convencional de estabilización de tipo facultativo en la que se propicia o promueve el crecimiento del lirio acuático, seguida de una laguna de pulimiento sin plantas acuáticas. Como parte de los trabajos realizados en ésta investigación, se lleva a cabo una extensa revisión bibliográfica de experiencias obtenidas en trabajos similares y se hicieron estudios experimentales comparativos del comportamiento de tres modelos de lagunas de estabilización con y sin lirio acuático bajo distintas condiciones de operación. Los resultados obtenidos, sin pretender ser -

inovativos, sirven para confirmar la bondad del sistema en las condiciones climatológicas de la ciudad de México.

A-2 Revisión Bibliográfica

Entre los principales estudios realizados sobre éste tema, deben mencionarse los de la doctora Kaethe Seidel en el departamento limnológico del Instituto Max Planck de Alemania Federal, los estudios sistemáticos sobre el comportamiento de lagunas con lirio acuático realizados en los laboratorios de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) en los EE.UU., estudios a nivel piloto realizados en una planta de tratamiento de aguas negras en Austin, EE.UU., y estudios similares en la Universidad de Michigan, EE.UU. A continuación se presenta un breve resumen de los más importantes conclusiones arrojadas en dichos estudios.

En Austin, Texas, EE.UU., se operó una unidad piloto con lirio acuático (69) (*Eichornia crassipes*) en el tratamiento del efluente de una planta de tratamiento secundario; las características medias del agua a tratar fueron las siguientes (en mg/l):

DBO ₅	19	N ₂ NOrg	4.3
DBO	46	PO ₄ [≡]	15.4
SST	46	DQO	82
N ₂ NH ₃	2.1	Colis F.	2536/100ml.

Las condiciones de operación de la planta piloto fueron las siguientes:

Tiempo de retención	4 días
Carga orgánica	5.1 g/m ² -día
Peso del lirio acuático	53.89 Kg/m ² (húmedo) 2.49 Kg/m ² (seco).
Composición aprox. del lirio acuático	carbohidratos= 1.71 Kg/m ² sales minerales= 0.46 Kg/m ² proteínas = 0.18 Kg/m ²
Tasa de crecimiento del lirio acuático	1 a 2 Kg/m ² -día. (húmedo).

Suponiendo una tasa media de crecimiento de 1.5 Kg/m²-día, y una concentración de lirio de 53.89 Kg/m², el tiempo que se requiere para doblar la concentración es de 36 días, resultando que es consistente con los resultados obtenidos en los modelos operados en éste trabajo.

Las eficiencias en remoción de contaminantes registradas en la planta piloto de Austin. fueron las siguientes:

DBO ₅	82%	N ₂ Norg	74%
DBO	81%	PO ₄ ⁼	31%
SST	85%	DQO	61%
N ₂ NH ₃	71%	Colis F.	96%

Algunas observaciones de importancia registradas por los autores en relación con el plancton presente en el agua son las siguientes: en la laguna piloto la población planctónica estuvo dominada por algas azul-verdes, el efluente a simple vista era claro y contenía una baja concentración de fitoplancton, siendo dominantes las diatomáceas con presencia de algas verdes.

El sistema de tratamiento con cañas y juncos acuáticos desarrollado en el Instituto Max Planck de Alemania Federal ha sido ya patentado y se explota comercialmente en los EE.UU. (Biological Water Purification of California, Inc; Newport Beach, EE.UU.). Este sistema consta de un grupo de filtros biológicos con grava, arena y plantas, generalmente cañas acuáticas del género *Phragmites*, seguidas de lechos de arena con juncos acuáticos (*Scirpus lacustris* ó *Scirpus validus*). Los filtros biológicos son operados intermitentemente, siguiendo un ciclo de llenado y vaciado, y los lechos de arena se operan en forma continua. Las remociones típicas mencionadas por los vendedores de éste sistema son los siguientes:

Característica (mg/l)	Influente	Efluente
DBO	720	72
SST	3284	71
SDT	1100	1384
PO ₄ ⁼	180	44
NTK	412	83

Otros sistemas recientemente investigados ⁽⁴⁸⁾ son los formados por un filtro

biológico con juncos acuáticos de diversas especies en la superficie Scirpus sp). El filtro lo formaba un lecho inferior de arena de 15 cm de espesor, seguido de un lecho de grava gruesa de 30 cm y un lecho superior de grava fina de 30 cm que servía de soporte a las raíces del junco. El agua escurre libremente por la superficie del filtro y es recogida por medio de drenes en la parte inferior. Los tiempos de retención empleados varían de 5 horas a 10 días (los tiempos de retención son calculados a partir del gasto y volumen total del filtro, sin deducir los volúmenes ocupados por la grava y arena); los resultados obtenidos son comparados con una unidad de control, similar a los filtros de prueba, pero sin plantas. Los resultados obtenidos fueron inconcluyentes como lo muestra el resumen que a continuación se presenta:

Procedencia del Influyente. Unidad de Tratamiento:	Tiempo de Retención (h)	Eficiencia de Remoción (%)					
		DBO		ST		P-Tot.	
		Control	Lirio	Control	Lirio	Control	Lirio
Secundario	5	75	91	-17	25	33	31
Secundario	16	77	72	57	49	81	44
Secundario	240	71	79	43	29	36	32
Primario	240	83	87	37	18	36	25

Una amplia serie de estudios ha sido también realizada por la NASA en EE.UU., en Mississippi y los resultados han sido presentados en forma de memoranda técnico, cubriendo los siguientes tópicos:

- a) Filtración final de aguas negras empleando lirio acuático⁽⁷⁰⁾
- b) Empleo de lirio acuático para incrementar la eficiencia de lagunas de estabilización.⁽⁷¹⁾

- c) Empleo de lagunas con lirio acuático para remoción de fenoles. ⁽⁷²⁾
- d) Empleo de lagunas con lirio acuático para remoción de metales pesados: plata, cobalto y estroncio; ⁽⁷³⁾ cadmio y níquel; ⁽⁷⁴⁾ plomo y mercurio. ⁽⁷⁵⁾
- e) Conversión biológica del lirio acuático a gas metano. ⁽⁷⁶⁾
- f) Empleo de plantas acuáticas vasculares para remoción de contaminantes y producción de energía y alimentos. ⁽⁷⁷⁾
- g) Empleo de lagunas con lirio acuático para remoción de ciertos insecticidas. ⁽⁷⁸⁾

A continuación se presenta un breve resumen de los resultados más importantes arrojados por éstos estudios.

a) Las pruebas de remoción de contaminantes tuvieron lugar en recipientes de 5 l, empleando 4.5 l de aguas negras crudas y aguas negras tratadas de una planta de tratamiento secundario; se empleó un recipiente como control (sin plantas de ninguna especie) y 2 recipientes con lirio acuático (*Eichornia crassipes*) y una con junco acuático (*Alternanthera philoxeroides*), respectivamente. Al cabo de 14 días se determinaron los porcentajes de remoción de contaminantes en el agua obteniéndose los siguientes resultados:

Lirio Acuático	Eficiencia de Remoción (%)			
	Aguas Negras Crudas		Efluente Secundario	
	Lirio	Control	Lirio	Control
DBO	97	61	77	6
NTK	92	18	75	15
P ₂ -Total	60	12	87	11
SST	-	-	75	18
COT	-	-	82	-28
pH	7.2	7.0	7.2	8.8
	a 7.4	a 7.9	a 7.4	a 8.2

Junco Acuático	Eficiencia de Remoción (%)			
	Aguas Negras Crudas		Efluente Secundario	
	Junco	Control	Junco	Control
DBO	-	-	90	15
NTK	98	31	83	12
P ₂ -Total	71	30	59	21
SST	-	-	87	33
pH	7.1	7.1	8.9	8.9
	a 7.4	a 8.2	a 7.2	a 8.4

b) La eficiencia de remoción de contaminantes del efluente de una laguna aereada de estabilización fué investigada en una laguna experimental con lirio acuático con las siguientes características:

Area superficial	2800 m ²
Volúmen	6800 m ³
Profundidad media	2.43 m
Gasto	522 m ³ /día = 6 l/s.eg.
Tiempo de retención	14 a 21 días, dependiendo de las tasas de evapotranspiración

Las características medias del influente fueron las siguientes:

SST	33 a 77 mg/l
SDT	187 a 390 mg/l
DBO	19 a 27 mg/l
NTK	2.23 a 6.17 mg/l
P ₂ -Total	4.8 a 7.3 mg/l
COT	24 a 36 mg/l
pH	6.8 a 7.8
OD	5.0 a 6.0 mg/l
Temp.	22 a 28° C
Colis	64 000 a 159 000 por 100 ml

Las eficiencias comparadas de remoción de contaminantes en una laguna de control (sin plantas acuáticas) a las lagunas con lirio fueron las siguientes:

Eficiencia de Remoción (%)
(Promedio de los meses de julio a septiembre de 1975)

	Lirio	Control
DBO	73	-63
NTK	64	- 2
P _T -Total	20	- 1
SST	75	4
COT	30	-12
SDT	15	4
Colis	78	-
OD en descarga (mg/l)	2.0	7.0

c) Una comunidad de lirio acuático creciendo en condiciones favorables puede duplicarse en aproximadamente 2 semanas, lo que representa una capacidad de síntesis del orden de $54 \text{ g/m}^2\text{-día}$, peso seco, ó cerca de $1.17 \text{ Kg/m}^2\text{-día}$, peso húmedo; ésta extraordinaria capacidad reproductiva, que excede considerablemente los rendimientos de plantas terrestres, es a su vez causa de problemas de eutrificación y fuente potencial de remoción de nutrientes en el agua. Una serie de estudios realizados por la NASA en relación con la capacidad del lirio acuático para remover fenoles del agua arrojó resultados muy prometedores. Los experimentos se realizaron en recipientes de 1 l de capacidad y distintas concentraciones de fenol al inicio del experimento. Las concentraciones empleadas fueron de 25, 50, 100 mg/l, y las eficiencias de remoción fueron medidas a las 24,

48 y 72 horas. Los resultados obtenidos reflejan una capacidad de remoción de fenoles del orden de 36 mg de fenol por gramo de peso seco de la planta en 72 horas, lo que representa aproximadamente, 53 Kg de fenol por día por hectárea.

d) La toxicidad de los metales pesados es uno de los problemas más serios que enfrenta todo sistema de tratamiento de aguas residuales; el empleo de lirio acuático en la remoción de metales pesados fué objeto de una serie de estudios por parte de la NASA obteniéndose las capacidades de remoción que a continuación se mencionan:

Plata	385 g/ Ha-día
Cobalto	341 g/ Ha-día
Estroncio	326 g/ Ha-día
Cadmio	401 g/ Ha-día
Níquel	300 g/ Ha-día
Plomo	261 g/ Ha-día
Mercurio	226 g/ Ha-día

e) La generación de gas metano a partir de la digestión anaeróbica del lirio acuático es una posibilidad que merece cuidadoso estudio. Los estudios preliminares realizados en la NASA indican una producción de 14 ml de gas metano por gramo de peso seco de lirio; considerando una producción media de lirio de 10 Ton/Ha-día, la capacidad productora de gas es de 140 m³ de gas metano por hectárea por día. Considerando una capacidad calorífica del metano de 11.26 HP-h por metro cúbico, la posible generación de energía es del orden de 65 HP por hectárea; ésta es, por supuesto, una estimación teórica y tendría que ser ajustada por las distintas

eficiencias de los procesos involucrados.

f) Uno de los principales problemas que plantea el empleo del lirio acuático en el tratamiento de aguas residuales es el de su cosecha y procesamiento. En lo referente a la recolección, la NASA tiene en elaboración un proyecto para el desarrollo de una recolectora con una capacidad estimada de 14 a 18 toneladas diarias; si la capacidad reproductiva estimada es de 10 ton/Ha-día, cada unidad de éstas podrá dar servicio a 1.4-1.8 hectáreas de laguna. Una vez cosechados los lirios, el siguiente paso en el procesamiento estudiado es el desmenuzamiento de las plantas en secciones no mayores de 2,5 cm. Después de ser desmenuzadas las plantas pueden ser digeridas anaeróbicamente; el gas producido se puede emplear para generar energía y el lodo residual puede servir como fertilizante agrícola. Otra alternativa de procesamiento del lirio desmenuzado la constituye su aprovechamiento como alimento del ganado, para lo cual es necesario disminuir el contenido de humedad de las plantas por medio de secadores solares o secado artificial. Otras alternativas de aprovechamiento de lirio se encuentran actualmente en estudio, siendo factible su empleo como complemento alimenticio humano y animal.

g) Otros tipos de plantas acuáticas (*Nymphaea odorata* y *Paspalum distichum*) han sido investigadas en la remoción del insecticida "mevinphos" (dimetil-1-carbometoxi-1-propen-2-1-fosfato). Las plantas empleadas removieron de 87 a 93 mg/l del insecticida en el agua en un período de 2 semanas sin daño aparente a las plantas.

En Holanda se ha investigado a nivel de prototipo la eficiencia de remoción de nutrientes y materia orgánica de lagunas con juncos acuáticos (*Scirpus lacustris*) con resultados igualmente alentadores. Los resultados reportados por el Dr. de Jong,⁽⁷⁹⁾ cubren un período de investigación iniciado desde 1967. La laguna empleada tiene una superficie de 0.1 Ha y una profundidad de 0.4 m; los tiempos medios de retención son de 10 días y las características principales de operación son las siguientes:

Parámetro	Concentración (mg/l)		Remoción (%)
	Influyente	Efluyente	
DBO	257	11	96
DQO	530	70	87
Colis F. (NMP/100ml)	3.6×10^5	3.1×10^2	99.9

Las eficiencias de remoción de nitrógeno total de Kjeldhal y fósforo, son igualmente altas; el autor propone como norma, una capacidad de remoción teórica de nutrientes no mayor que la contenida en el rendimiento o cosecha de las plantas acuáticas.

La capacidad de remoción de nitrógeno y fósforo fué también estudiada en dos universidades del estado de Florida, EE.UU.;^(80,81) los resultados indican una capacidad asimilativa de fósforo, del lirio acuático, de 5.5 mg por gramo de peso seco de lirio, en un período de 3 semanas y remociones prácticamente totales del nitrógeno amoniacal presente, originalmente en

concentraciones de 50 a 100 mg/l .

A-2 Estudios Experimentales

A-2-1 Objetivos y Alcances

Más que definir técnicamente los detalles del funcionamiento del sistema de tratamiento de lagunas con lirio acuático, se pretende en éste estudio, establecer patrones comparativos entre los sistemas convencionales y los sistemas adaptados con flora acuática nativa. Sus alcances son limitados principalmente por la escala del modelo experimental, sin embargo, son lo suficientemente descriptivos de las posibilidades de utilización de técnicas novedosas y sobre todo económicas, para la remoción de ciertos contaminantes de los efluentes superficiales del país.

Es importante hacer mención de que en el presente informe no se incluyen la totalidad de los resultados obtenidos, algunos de suma importancia, como son los descriptivos del comportamiento de los metales pesados en el sistema; así mismo, es importante mencionar que el experimento continúa, y son programadas modificaciones y variantes para su estudio integral, más los resultados que se presentan, cumplen los objetivos específicos mencionados anteriormente, es decir, procurar sistemas de tratamiento económicos para el aprovechamiento de aguas residuales en irrigación.

A-2-2 Diseño del Experimento

La doble finalidad de introducir plantas acuáticas a las lagunas convencio-

nales es por una parte aprovechar su capacidad para incrementar los desarrollos biológicos a través del excelente medio de apoyo que proporcionan, acelerando así la remoción de materia orgánica. Así mismo, éstas plantas presentan la capacidad de metabolizar compuestos refractarios y de absorber elementos tóxicos como metales pesados, superando de ésta forma, a las ventajas que ofrece una laguna de estabilización convencional.

La bibliografía reporta diversos experimentos con varios tipos de plantas acuáticas, entre ellos, el lirio acuático, planta ampliamente difundida en nuestro medio, razón por la cual fué seleccionada en el diseño del modelo que contempla diversas condiciones a fin de dictaminar la óptima o la que ofrezca mayores ventajas de adaptación. Las condiciones estudiadas son las siguientes:

- 1) Laguna con lirio y lodo bentónico, simulando las condiciones de un lago eutrificado (LLA).
- 2) Laguna con lodo bentónico, simulando una laguna convencional con algún tiempo de funcionamiento que ha permitido la sedimentación de sólidos (LA).
- 3) Laguna convencional con operación reciente (A).

El modelo fué adaptado a nivel experimental en acuarios similares y bajo condiciones de tratamiento iguales a fin de permitir una comparación válida, ya que no se cuenta con repeticiones o pruebas estadísticas altamente significativas.

Los detalles de adaptación, operación y evaluación de los resultados, son presentados a continuación:

A-2-3 Descripción del Modelo

El modelo consiste de 3 recipientes de paredes de vidrio sellados por las aristas con silicón y cubiertos con cartulina gruesa a fin de impedir el paso de la luz solar, como se muestra en la figura A-1. Las dimensiones son de 50 x 50 cm y 50 cm de profundidad.

Los modelos fueron instalados en el área de modelos del Centro de Investigación y Entrenamiento para el Control de la Calidad del Agua (CIECCA), S. R. H., ubicado al sur de la Cd. de México y con las características climatológicas que se presentan en el cuadro A-1. (82)

El agua residual procede de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de Chapultepec, D. F., colectando aguas crudas en la estructura de llegada para transportarlas en una pipa hasta el sitio de almacenamiento en el CIECCA. Estas operaciones fueron efectuadas con frecuencia semanal a fin de disponer de aguas "frescas".

Los lirios y lodos bentales fueron colectados en los canales donde es descargado el efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Xochimilco, D. F., sembrando lodos en las lagunas LLA y LA, y lirio únicamente en la laguna LLA.

Las características de diseño del modelo, una vez adaptado, se resumen a continuación:

- Dimensiones	90 x 50 x 50 cm
- Volúmen total	225 l
- Bordo libre	10 cm
- Capa de lodos bentales (Lagunas LLA y LA)	6 cm
- Volúmen de lodos bentales	27 l
- Volúmen efectivo de agua	153 l
- Area superficial	0.45 m ²
- Tirante	34 cm

A-2-4 Operación del Modelo

En el desarrollo del modelo pueden distinguirse tres etapas características que son:

- a) Arranque: Corresponde a la puesta en marcha de las tres lagunas (Marzo 26 de 1976).
- b) Aclimatación: Marzo 27 a mayo 3 de 1976. Período destinado al desarrollo biológico adecuado a cada una de las condiciones.

El control de las lagunas fué llevado por medio de un monitoreo diario a la misma hora (12.00 hrs), de los siguientes parámetros medidos en el centro de la laguna: pH, Oxígeno disuelto y temperatura. La DQO fué medida tres veces por semana y se hicieron esporádicos muestreos para análisis biológicos.

En éste período y hasta la terminación de la primera serie de experimentos (Julio 12 de 1976), se alimentó dos veces al día, la cantidad de 5.1 l (excepto los fines de semana), de aguas crudas, purgando la misma cantidad mediante sifones graduados de gasto constante, como se muestra en la figura A-1. El volúmen de las tres lagunas se man-

tiene constante añadiendo agua destilada o retirando excedentes para compensar la evaporación y/o lluvia.

Cuando la variación de los parámetros de control dejaron de ser drásticas, se pasó a la fase de condiciones estables, misma que se describe a continuación:

c) Condiciones estables: Es la fase más importante y en la cual, propiamente fué evaluada la eficiencia del modelo. En ella, la metodología de alimentación y purga fué la misma del período de aclimatación. Se incluyó además, una toma de muestra con una frecuencia de tres veces por semana en el influente y efluente de cada laguna para determinación de los siguientes parámetros de control:

- Materia orgánica: DBO₅ y DQO disuelta.
- Sólidos: SST, SSF y SSV
- Nutrientes: NTK, N₂-NO₃ y PO₄⁻ total.
- Detergentes: Sustancias acivas al azul de metileno (SAAM).
- Metales pesados: Fe⁺⁺, Cu⁺⁺, Ni⁺⁺, Pb⁺⁺, Cr⁺⁺ y Zn⁺⁺
- Exámenes biológicos: NMP de Coliformes totales, Estreptococos fecales, Fitoplancton y Zooplancton y control de los diferentes cambios de coloración de las aguas de las lagunas por los crecimientos explosivos de los organismos biológicos.

A-2-5 Resultados Experimentales

Las características de las aguas residuales alimentadas a los modelos durante las etapas de aclimatación y condiciones estables se muestran en el cuadro A-2. Las condiciones medias de operación del sistema son las siguientes:

- Tiempo de retención 15 días

-	Carga hidráulica	10.2 l/día
-	DBO ₅ promedio	76 mg/l
-	Carga orgánica	0.78 g/día
-	Carga orgánica superficial	1.72 g/m ² -día
-	Carga hidráulica superficial	22.67 l/m ² -día
-	Alimentación y purga	Intermitente (2 veces al día).

En la fase de aclimatación, que tuvo una duración de 30 días, fueron observados cambios sustanciales en las características de las aguas de las lagunas experimentales, como se muestran gráficamente en la figura A-2. Estos cambios se pueden resumir de la siguiente forma:

- Incremento del pH y el oxígeno disuelto en las lagunas con lirio y agua solamente, notándose una tendencia a alcanzar las condiciones estables (neutras), así como un incremento paulatino del oxígeno disuelto en la laguna con lirio y lodo bental.

Las condiciones se estabilizan en un lapso de 3 meses durante el cual se lleva un riguroso monitoreo del influente y efluente de cada laguna a fin de evaluar la eficiencia del modelo en función de sus efectos en una serie de parámetros de calidad de agua cuyos resultados se presentan de una manera gráfica en las figuras A-3 a A-9 a fin de seguir cuidadosamente el desarrollo de éstos en referencia de las variaciones de la población biológica (bacterias y plancton), de la cual se llevó también un control rutinario, presentando en los cuadros A-3 a A-7, dichos resultados. El efecto que los crecimientos biológicos presentan en la coloración de las aguas fué observado, refiriendo tales variaciones en el cuadro A-8.

El extraordinario crecimiento del lirio acuático de las lagunas de estabilización hizo necesario retirar excedentes, procurando una población equilibrada y constante. Las cantidades periódicamente retiradas, así como las tasas de crecimiento, se anotan en el cuadro A-9, reportando un resumen de las características de operación del modelo en el cuadro A-10.

A-3 Discusión

La caracterización de muestras superficiales al centro de las lagunas durante el período de aclimatación, permitió observar las tendencias evolutivas de las condiciones fisicoquímicas y biológicas en cada variante experimental estudiada. Fue observado un crecimiento biológico similar en las tres lagunas debido a la igualdad del alimento disponible, temperatura y alimentación. Al cubrirse la superficie de la laguna LLA por efecto del aumento del número de plantas de lirio, el desarrollo algal fue inhibido permitiendo que las variedades *Chlorella*, *Ankistrodesmus*, *Scenedesmus* y afines, al seguir con el proceso fotosintético, promovieran la elevación del pH al desplazar el equilibrio $\text{CO}_3\text{-HCO}_3$.⁽⁸³⁾

Es fundamental la magnitud de las poblaciones biológicas en la definición de unas condiciones estables, criterio que fue empleado en éste caso, observándose crecimientos de algas, protozoarios y la aparición de rotíferas en suficiente cantidad como para llevar a cabo la remoción de materia orgánica y nutrientes esperada en los sistemas de tratamiento en lagunas.⁽⁴⁹⁾

A través del período de operación de los modelos de lagunas de estabilización con lirios acuáticos y unidades testigo, se observaron cambios de coloración en las aguas, en ocasiones bastante drásticos, que en cierto grado obedecieron al desarrollo preferente de algunos tipos de microorganismos, fundamentalmente algas.

A continuación se bosqueja un panorama general de las situaciones particulares encontradas en cada laguna, relacionadas a la calidad del influente utilizado, grupos de algas prominentes y coloración de las aguas:

- Laguna LLA: En el período comprendido entre finales de marzo a principios de mayo, no se notaron cambios sustanciales en el color de las aguas, que se observaron de un verde claro uniforme, encontrándose como géneros dominantes organismos flagelados y algas verdes. Entre los días 11 y 17 de mayo, el influente se caracterizó por sus altos contenidos de nitrógeno, que propició un desarrollo explosivo de algas cianofitas filamentosas que confirieron un color café claro persistente hasta inicios del mes de junio. Este comportamiento se infiere de las gráficas de calidad de las aguas de las figuras A-8 y A-9.

- Laguna LA: Al igual que en el caso anterior, de marzo a mayo es patente el dominio de las algas verdes y azul-verdes, presentando el agua una coloración verde intenso, exceptuando los días 11 a 24 de mayo en que fué evidente el dominio de cianofitas, por el color café intenso observado en las aguas.

- Laguna A: En éste caso se observó una presencia constante de algas verdes, con pocos cambios en la coloración de las aguas, que se observaron invariablemente con tonos del verde claro al verde intenso.

Como un comentario adicional respecto a los géneros de algas encontrados, puede decirse que corresponden a los tipos característicos, tanto de aguas limpias como de contaminadas y dominaron alternadamente, pudiéndose subo-
ner que éste fenómeno se debe a la carga orgánica relativamente baja que se aplicó rutinariamente al modelo, (1.7 g/m²-dfa).

En la fase de condiciones estables se observa una variación periódica de la concentración de los parámetros en el influente que es efecto del almacenamiento dado al agua con que fué alimentado el modelo y que tuvo influencia en las lagunas. Estas variaciones se muestran en cierta forma atenuadas para la DBO y en menor grado para los nutrientes nitrógeno y fósforo, especialmente en la laguna LLA.

La remoción de materia orgánica (DBO) en la laguna LLA siguió las condiciones ideales del modelo cinético de la descomposición biológica en estanques facultativos y que está dada por la siguiente fórmula:

$$L_p = \frac{L_o}{(Kt \cdot Rt) + 1} \quad \text{donde}$$

L_p = DBO₅ del efluente (mg/l)

L_o = DBO₅ del influente (mg/l). (Promedio experimental= 69.5 mg/l)

K_t = Velocidad de descomposición a una temperatura dada: $K_t = 0.35$
por día a la temperatura de 20°C .
 R_t = Tiempo de retención = 15 días.

L_p (bibliográfica) = 11.1 mg/l. L_p (experimental) = 12.0 mg/l.

Los datos experimentales reportan concentraciones promedio de DBO en el efluente de la laguna LLA de $L_p = 12$ mg/l, siendo los valores encontrados en las lagunas LA y A de 32.2 y 29.8 mg/l respectivamente, lo cual confirma la eficiencia del modelo con lirios para la remoción de materia orgánica.

Para el nutriente fósforo se observaron tasas de remoción mayores del 50% en las fases iniciales del modelo; sin embargo, se presenta una disminución en la remoción a partir de las condiciones estables en las tres lagunas, posiblemente debido a la reutilización del elemento a partir de los microorganismos existentes.⁽⁸³⁾

Es importante mencionar la remoción constante de SAAM en el modelo (50% en la laguna LLA; 32% en la LA y 25% en la A), a pesar de las variantes concentraciones en el influente, lo que indica posiblemente, las limitaciones que dichos compuestos presentan al integral desdoblamiento o digestión.

Las eficiencias promedio de remoción calculadas para los parámetros estudiados (Cuadro A-10), otorgan mayores cualidades de tratamiento a la laguna con lirio, lodo y agua (LLA), en comparación con las variantes LA y A, encontrando que las eficiencias obtenidas en la primera son del mismo orden que las reportadas en la bibliografía para experimentos similares, por

lo que es factible, dado el clima y las condiciones particulares del país, adaptar dicho modelo en gran escala.

La variante LA, usada como contraste en la evaluación del modelo con lirio, permitió un excelente apoyo al desarrollo del protozoo; sin embargo, las características de remoción fueron muy restringidas, en comparación con la variante A, que es la simulación de una laguna convencional con poco tiempo de operación.

En general, fueron observadas altas tasas de remoción de estreptococos fecales y coliformes totales, debido posiblemente, a la abundante presencia de protozoarios, que aunque su influencia no es directa como se menciona en la bibliografía, sí es decisiva, ignorándose el procedimiento.

La población biológica presenta gran variedad, no estableciéndose una especie marcadamente dominante, aunque hay grupos como *Chlorella*, *Monas*, *Ankistrodesmus*, *Selenastrum* y *Chlamydomonas*, que se presentan en grandes cantidades, dominando alternativamente en el modelo. En resumen, los grupos dominantes en cada laguna, fueron los siguientes:

- Laguna LLA; desarrollo algal: Inicialmente dominan *Chlamydomonas* y *Eudorina*, generalmente especies superficiales que necesitan grandes cantidades de luz incidente para su desarrollo. Posteriormente domina *Chlorella*, *Eudorina* y *Euglena* al impedirse la formación de las natas típicas de las *Chlamydomonas* por el lirio superficial. Las especies mencionadas presen-

tan migración vertical para la captación de luz y su desarrollo sólo es posible en los estratos superficiales.⁽⁸⁴⁾ En LLA, el protozoo es abundante en monas, restringiéndose el desarrollo algal por falta de penetración de luz incidente, hecho que favoreció el crecimiento de *Cyclidium* y *Colpidium*, ambas variedades propias del zooplancton.

- En las lagunas LA y A fueron observados crecimientos explosivos de ciertas variedades verdes y rojas, con una extraordinaria población de los géneros *Pediastrum*, *Scenodesmus*, *Ankistrodesmus*, *Selenastrum*, Cianofitas y *Chlorella*, siendo ésta última, indicadora de que el sistema es eficiente en lo referente a la materia orgánica.⁽⁸⁴⁾ La conjunción de varias especies dominantes es indicativa de una insuficiente carga orgánica superficial en la alimentación, razón por la cual se decidió incrementar ésta en una serie de experimentos posteriores.

La presencia de *Rotifera* en la laguna LLA permitió la incorporación de oxígeno a pesar de la disminución de la población algal, lo que trajo en consecuencia, una mayor actividad bacteriana para desdoblar la materia orgánica, lo que aunado a los especiales procesos adsortivos del lirio, permitió tenerse una excelente remoción de contaminantes del agua residual.

Los procesos bioquímicos en las lagunas de tratamiento son complejos, siendo en muchos casos incongruentes los resultados reportados por distintos autores. En la figura A-10, se presenta un esquema, aceptado para la comprensión de los distintos procesos bioquímicos mencionados.⁽⁸⁴⁾

La incorporación de los resultados sobre la eficiencia de remoción de metales pesados en el modelo, proporcionará un panorama completo de la viabilidad de uso comercial de tan eficiente y económico sistema de tratamiento, probados aquí en lo referente a nutrientes, materia orgánica y sustancias activas al azul de metileno (detergentes).

Una de las mayores desventajas que tienen las lagunas con lirio acuático es su rápido crecimiento, siendo la remoción de excedentes una labor agobiante ya que se pueden alcanzar rendimientos promedio hasta de 1.17 --- Kg/m²-día, pudiéndose duplicarse la concentración del lirio en un período de 15 días.⁽⁷²⁾ Los resultados experimentales obtenidos sobre éste aspecto, concuerdan con los reportados en la bibliografía, únicamente en lo referente al tiempo requerido para doblar la concentración, ya que la capacidad reproductiva promedio encontrada resultó ser 1/10 de la referida en estudios similares.

A-4 Conclusiones y Recomendaciones

- El control del experimento en base a las características fisicoquímicas y biológicas de las aguas, permitió una excelente operación del modelo experimental probado, siendo los resultados obtenidos, de gran similitud con los reportados en la bibliografía para experimentos semejantes, lo cual indica que la pequeña escala del modelo probado no fué una limitante de consideración.

La detección de la magnitud y diversidad de las poblaciones biológicas desarrolladas en la laguna con lirios acuáticos permite concluir que su adaptación bajo las condiciones naturales del país, no representa un obstáculo para el empleo de dicho sistema de tratamiento de agua residual en México.

La eficiencia de remoción de contaminantes del agua en las lagunas de estabilización convencionales, puede ser incrementada de un 25 a 400%, dependiendo del tipo de contaminante específico, por la incorporación de lirio acuático, hecho que merece tomarse en cuenta en los proyectos de reutilización de agua residual en la agricultura, principalmente, ya que la calidad del efluente, de acuerdo a las normas de calidad de agua de riego, es adecuada para su aprovechamiento directo, aún sin el empleo de lagunas de pulimiento u obras auxiliares que refinan la calidad del agua tratada en las lagunas con lirios.

Es de sumo interés el continuar con el experimento a fin de estudiar la remoción de metales pesados, plaguicidas y sustancias tóxicas en lagunas con lirio acuático, ya que este sistema de tratamiento es factible de adaptarse con fines de reuso de agua en la industria en sustitución de sistemas terciarios con altos costos de operación.

CUADRO A - 1

RESUMEN DE DATOS HIDROMETRICOS

Parámetro	M e s e s												Anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Evaporación (mm)	107	112	150	126	166	152	112	123	89	94	110	75	1414
Temperatura (°C)	10.4	11.5	14.2	16.7	17.5	17.6	16.6	16.7	16.6	15.9	14.1	13.2	15.1
Humedad Relativa (%)	56	54	43	56	59	65	71	67	72	67	61	69	62
Viento Dominante (m/seg)	-	W 1.1	SSE 2.0	NNE 1.2	N 1.2	NNW 1.2	NW 1.2	N 1.2	-	N 0.9	N 0.8	N 2.0	W 1.1
Precipitación (mm)	14.3	1.0	53.7	26.9	63.0	92.2	247	213	185.8	32.5	0.0	3.7	933.1

Ref. : Boletín Hidrológico S. R. H.

Estación Hidrométrica de Cd. Universitaria, D. F.

CUADRO A-2

CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS DEL AGUA INICIAL
DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACION

Parámetro	Símbolo	(mg/l)
Sólidos Suspendidos Totales	SST	162
Sólidos Suspendidos Volátiles	SSV	17
Sólidos Suspendidos Fijos	SSF	145
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO	6.3
Demanda Química de Oxígeno	DQO	36.5
Nitrógeno de Nitratos	N_2NO_3	2.4
Nitrógeno Total Kjeldahl	NTK	6.7
Fosfato Total	PO_4^{3-} Tot	1.60
Detergentes	SAAM	0.16

CONTENDIO DE METALES PESADOS EN
EL LODO BENTAL DE LAS LAGUNAS
(mg/l en el extracto)

Fierro	Cobre	Níquel	Plomo
0.46	<0.05	<0.08	<0.004

POBLACION FITOPLANCTONICA DE LOS MODELOS DE LAGUNAS DE TRATAMIENTO

Identificación Taxonómica	F			E			C			H			A			S		
	Mar-29-76			Abr-5-76			Abr-12-74			Abr-19-76			May-4-76			May-11-76		
	LLA	LA	A	LLA	LA	A	LLA	LA	A	LLA	LA	A	LLA	LA	A	LLA	LA	A
Actinastrum		1	1		1	1		1	1		1							
Anabaena			1															
Anisonema						3	1	3	3	1	3	1	1	1	1			
Ankistrodesmus	2	1	5	1	3	1	1	1	3	1	4	1	1	1	3		1	4
Cidamydomonas	3	4		1	3		1	1		1	3	1	1	1	1	1		
Chlorella				3	3		5	5		3	5	1	1	5	3	1	1	1
Cianophita Filam.																1	3	1
Closterium	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1		1	1		1	1	1
Coelustrum			1															
Cyclotella			1					1										
Eudorina	3	1		4	3	1	4	3		1	1		2				2	
Euglena	3	4	4	1	1	1	2	4		1	1	1	2	1			2	2
Lepocinelis	4	1		1	1		1	3		1	3						1	
Micratinum													2				1	1
Microcystis				1		2		2		1				1			1	1
Navicula	1	1	2	1						1	1		1	1			1	1
Nitzschia	1																	
Pediastrum			5			3			2			1				1		1
Phacus				1			1				1						1	
Scenedesmus	3	1	5	1	1	5	1	1	5	1	1		1	4			4	5
Selenastrum							1		1		1		1	1				1
Tabellaria	1				1	1				1	1		1					1
Tragitaro	1																	
Ulothrix	1	1		1		1	1											

Notas: a) Concentraciones en Organismos /ml:

b) Tomá de muestra: 8.00 h.

- 1 = Escaso (<10)
- 2 = Figura (10-100)
- 3 = Abundante (100-1000)
- 4 = Muy Abundante (1000-5000)
- 5 = Exceso (>5000)

C U A D R O A-4

POBLACION FITOPLANCTONICA DE LOS MODELOS DE LAGUNAS DE TRATAMIENTO

Identificación Taxonómica	F			E			C			H			A			S		
	May-17-76			May-24-76			May-31-76			Jul-10-76			Jul-5-76			Jul-12-76		
	LLA	LA	A	LLA	LA	A	LLA	LA	A									
Arkistrodesmus		3	1	1	3	2	1	1	3		1	2		1	3	1	3	2
Chlamydomonas	3	1		2		1	1	1		1						1	1	
Chlorella	1	4	1		4				1	1				1			3	4
Cianophita Filam.	1	4			4	1		3	1				1	5	1			
Closterium	1			1	1	1					2	3						1
Diatoma																		1
Dicomonas					1	1												
Eudorina	2	1		2			1											
Euglena	2	1		2	1	1	1	1	1	1			1	1		1		2
Euglenofita											1			2		1		1
Lepocinelis				1														
Micranthinum		1		1	1		1	3		2	3			1	1			3
Microcystis		1	1		1	3		1	1	3	2			2				2
Navícula	1	1		1	1	1										1	1	
Nitzschia	1						1	1			1	1				2	2	
Oscillatoria											5	1				1	5	1
Pediastrum						3			2			2						
Phacus	1			2			1											
Scenedesmus		4	3	1	2	4	1	1	4	1	1	4		1	3			3
Selenastrum		4	2	1	3	2	1	1	4			3		3		1	2	3
Synedra						1			1									
Tabellaria		1																
Ulothrix				1			1											
Chlorococum												1			2			

Notas: a) Concentraciones en Organismos /ml:

1 = Escaso (<10)

2 = Figura (10-100)

3 = Abundante (100-1000)

4 = Muy Abundante (1000-5000)

5 = Exceso (> 5000)

b) Toma de muestra: 8.00 a 10.00 h.

C U A D R O A-5

POBLACION ZOOPLANCTONICA DE LOS MODELOS DE LAGUNAS DE TRATAMIENTO

Identificación Taxonómica	F E C H A S																					
	Mar-29-76			Abr-5-76			Abr-12-76			Abr-19-76			May-4-76			May-11-76			May-17-76			
	LLA	LA	A	LLA	LA	A	LLA	LA	A	LLA	LA	A	LLA	LA	A	LLA	LA	A	LLA	LA	A	
Amiba																	1					
Anélido																	1		1			
Anisomona																	1	1	1			
Colops			1					3										1				
Colpidium			1	3	1		1	1	1					3		1		1	1	1		
Cyclidium			1	3	1			3	2	3		1	3		2	1		1		2	1	
Dileptus																				1		
Dinoflagelado						4								4								
Lionotus	2										1				1							
Monas	2	4		3	1	4		4	1	1	1	1	1		1	2	1	1	1	3	1	
Naegleria																					3	
Nematodo	2							1								1			1			
Oikomona						1		4	1													
Paramecium						1																
Peridinium			1																			
Pteromona										3		1	1									
Radiolario	2	3		1	1					4			1									
Rhodomonas			1					3				1										
Rotífera						1	1			1	3		2		2	2						
Thecamocba				1																		
Vorticella	2								1							2		1				

Notas: a) Concentraciones en Organismos /ml:

1 = Escaso (<10)

2 = Figura (10-100)

3 = Abundante (100-1000)

4 = Muy Abundante (1000-5000)

b) Toma de muestra: 8.00 h.

C U A D R O A - 6

CARACTERISTICAS BACTERIOLOGICAS DE LAS AGUAS
DE LAS LAGUNAS DE TRATAMIENTO

Coliformes Totales
(NMP/100 ml)

Fecha 1976	Influyente	L A G U N A S		
		L L A	L - A	A
(1) Mar-29	-	5.4×10^5	7×10^3	170
(1) Abr-5	-	3.5×10^3	1.3×10^3	220
(1) Abr-12	-	1.7×10^4	4.6×10^3	330
(1) May-10	-	$\approx 2.4 \times 10^5$	$\approx 2.4 \times 10^5$	$\approx 2.4 \times 10^5$
(1) May-17	-	9.2×10^3	110	540
May-24	3.3×10^4	2.6×10^3	1.7×10^3	1.4×10^3
May-31	$\approx 2.4 \times 10^5$	$\approx 2.4 \times 10^5$	$\approx 2.4 \times 10^5$	5.4×10^4
Jun- 7	2.8×10^6	1.1×10^5	1.4×10^4	1.1×10^3
Jun- 14	2.4×10^6	3.5×10^4	2.4×10^4	800
Jun- 28	$\approx 2.4 \times 10^5$	$\approx 2.4 \times 10^5$	$\approx 2.4 \times 10^4$	$\approx 2.4 \times 10^4$
Jul- 5	$\approx 2.4 \times 10^6$	$\approx 2.4 \times 10^5$	2.0×10^3	4.0×10^3
Jul- 12	2.4×10^7	9.2×10^4	1.6×10^6	2.2×10^4
Jul- 28	$\approx 2.4 \times 10^8$	1.6×10^6	1.6×10^6	7.0×10^3

Notas. (1) Los resultados presentados en esta fecha corresponden a -
muestras superficiales tomadas al centro de cada laguna.
Para el resto, la muestra fué tomada en el efluente.

CUADRO A-7

CARACTERISTICAS BACTERIOLOGICAS DE LAS AGUAS

DE LAS LAGUNAS DE TRATAMIENTO

Estreptococos Fecales

(NMP/100 ml)

Fecha 1976	Influyente	LAGUNAS		
		L L A	L A	A
(1) Mar 29	-	170	79	0
(1) Abr 5	-	130	240	0
(1) Abr 12	-	1400	260	220
(1) May 10	-	2.2×10^4	3.5×10^4	2600
(1) May 17	-	1700	79	350
May 24	1.7×10^4	2200 ₅	1400	220
May 31	$\approx 2.4 \times 10^5$	1.6×10^5	$\approx 2.4 \times 10^4$	1100
Jun 7	1.1×10^6	1.1×10^4	4000	1100
Jun 14	2.4×10^6	1300	1700	200
Jun 21	3.5×10^4	5400	790	330
Jun 28	$\approx 2.4 \times 10^5$	$\approx 5.4 \times 10^4$	$\approx 2.4 \times 10^4$	$\approx 2.4 \times 10^4$
Jul 5	1.6×10^6	$\approx 2.4 \times 10^5$	< 2000	< 2000
Jul 12	9.2×10^5	5.4×10^4	3.5×10^4	2200

Nota.: (1) Los resultados presentados en esta fecha corresponden a muestras superficiales tomadas al centro de cada laguna. Para el resto, la muestra fue tomada en el efluente.

CUADRO A-8

VARIACIONES DE COLORACION DE LAS AGUAS. DE LAS
LAGUNAS DE TRATAMIENTO

Fecha	L A G U N A S		
	LLA	LA	A
Mar-26	VI	VI	VI
Abr- 9	VC	VI	VI
Abr-19	VC	VI	CI
May- 4	VC	VI	VC
May- 6	CC	CI	VI
May-21	CC	VI	VC
May-27	CC	VI	VC
Jun- 2	CC	VO	VC
Jun- 4	CC	VO	VI
Jun- 14	C	VO	VC
Jun- 23	C	VO	VI
Jun- 28	C	VO	VC
Jul- 15	C	VO	VI

Notas. :

- 1) Se anotan únicamente las fechas donde fué observado un cambio de coloración.
- 2) VI - Verde Intenso CI - Café Intenso
VC - Verde Claro CC - Café Claro
VO - Verde Opaco C - Cristalino

CUADRO A-9

CAPACIDAD REPRODUCTIVA DEL LIRIO ACUÁTICO
EN LA LAGUNA DE TRATAMIENTO

Fecha (1976)	Fase Experimental	Excedentes Retirados (g) (Peso húmedo)	Capacidad Reproductiva (g /m ² /día) (húmedo)
Marzo 25 a Abril 26	Aclimatación	952.8	66.17
Abril 26 a Mayo 14	Condiciones Estables	1010.0	124.69
Mayo 14 a Junio 1	Condiciones Estables	1256.5	164.25
Junio 1 a Junio 15	Condiciones Estables	883.7	140.27
Junio 15 a Junio 29	Condiciones Estables	844.3	134.02
Junio 29 a Julio 12	Condiciones Estables	695.4	118.87
Promedio			124.71

- Notas: 1) Concentración inicial de lirio (sembrada) = 1.68 kg/m²
 2) Concentración experimental promedio de lirio = 2.03 kg/m² (aproximada).
 3) Tiempo requerido para doblar la concentración = 16 días.

CUADRO A-10

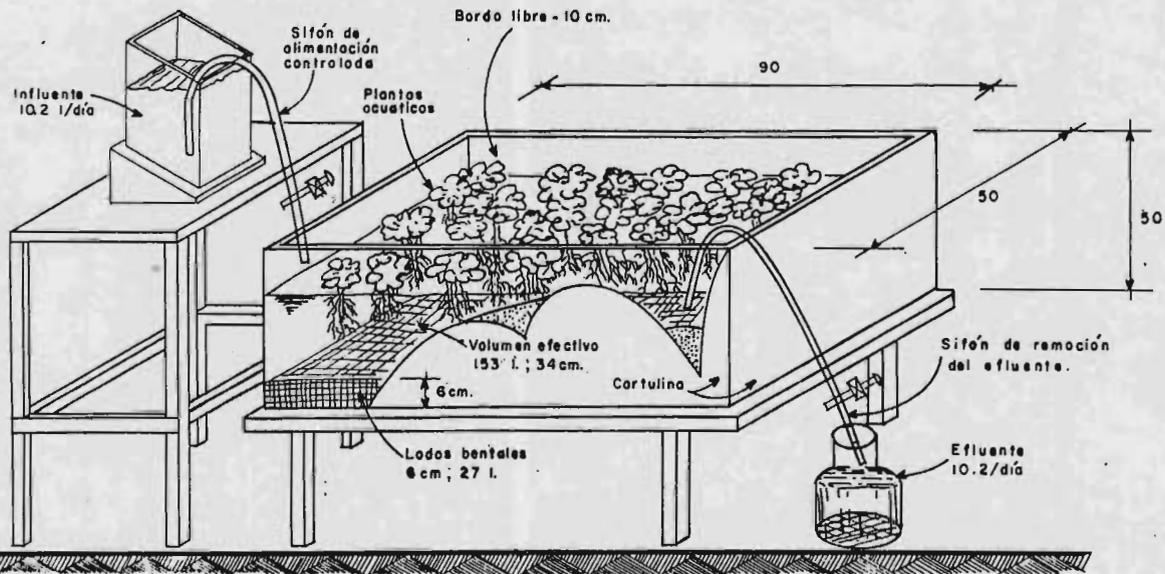
RESUMEN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Condiciones Medias de Operación: Prueba 1

Característica	L L A Modelo con Lirios Lodo y Agua		L A Modelo con Lodo y Agua		A Modelo con Agua Solamente	
	X	S _x	X	S _x	X̄	S _x
pH	7.2	0.30	9.5	0.57	9.9	0.49
Oxígeno Disuelto (mg/l)	4.7	2.06	17.5	5.02	15.9	4.34

Eficiencias Medias de Tratamiento: Prueba 1

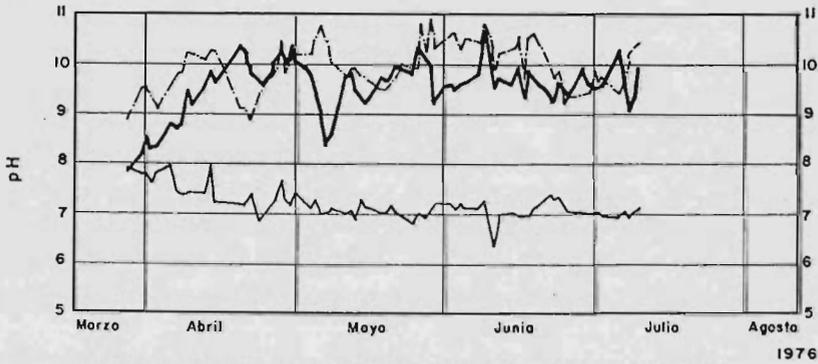
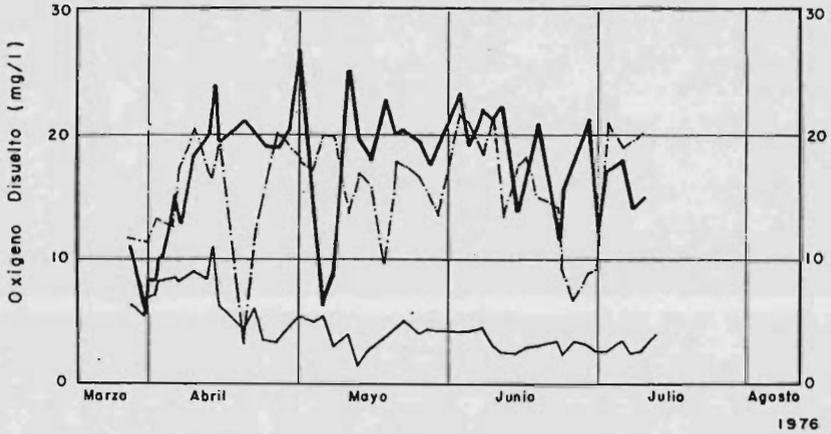
Parámetro	Eficiencias de Remoción (%)			Concentración de Contaminantes (mg/l)							
				Influente		Efluentes				A	
	LLA	LA	A	X̄	S _x	L L A		L A		X̄	S _x
						X̄	S _x	X̄	S _x		
DBO	83	54	57	69.7	28.50	12	5.6	32.2	10.6	29.8	9.7
DQO	42	9	16	159.2	60	93.0	41.5	145	63.5	134	41.7
NTK	80	24	48	16.6	8.00	3.2	2.4	12.6	5.6	8.7	5.0
N-NO ₃	25	10	-	0.40	0.50	0.30	0.40	0.36	0.27	0.45	0.51
PO ₄ Tot.	74	45	52	5.25	1.96	1.34	1.50	2.88	1.54	2.53	1.48
SAAM	54	32	25	7.8	4.81	3.57	2.27	5.29	3.65	5.82	3.96
Colif. Tot.	99.06	98.71	99.96	3.4x10 ⁷	8.4x10 ⁷	3.2x10 ⁵	5.3x10 ⁵	4.4x10 ⁵	7.2x10 ⁵	1.4x10 ⁴	1.9x10 ⁴
Estrep Fec.	91.95	98.54	99.52	8.2x10 ⁵	8.6x10 ⁵	6.6x10 ⁴	8.8x10 ⁴	1.2x10 ⁴	1.3x10 ⁴	3.9x10 ³	8.2x10 ³



MODELO DE LAGUNA DE ESTABILIZACION CON PLANTAS
ACUATICAS

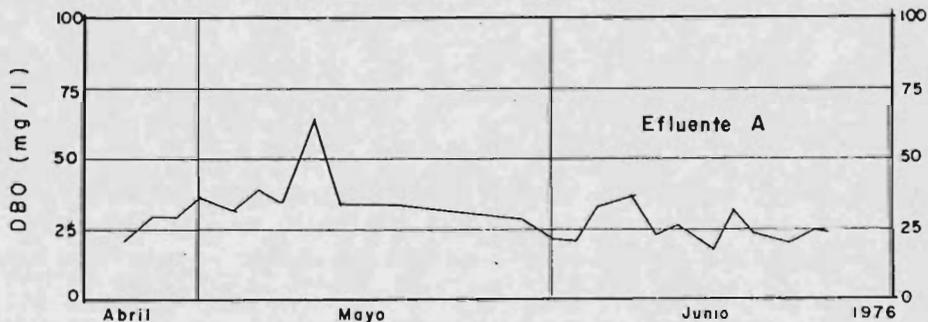
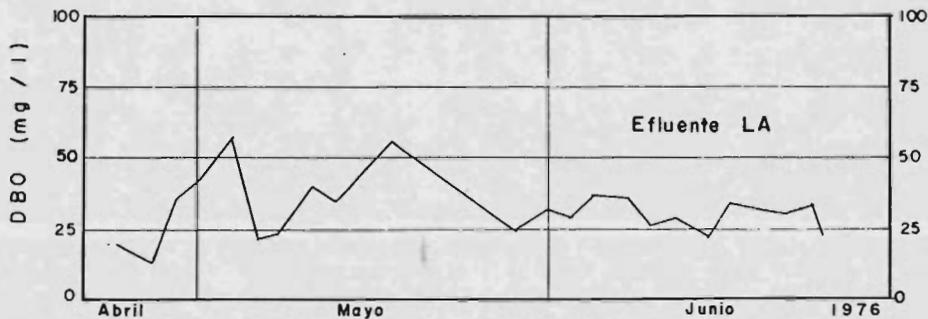
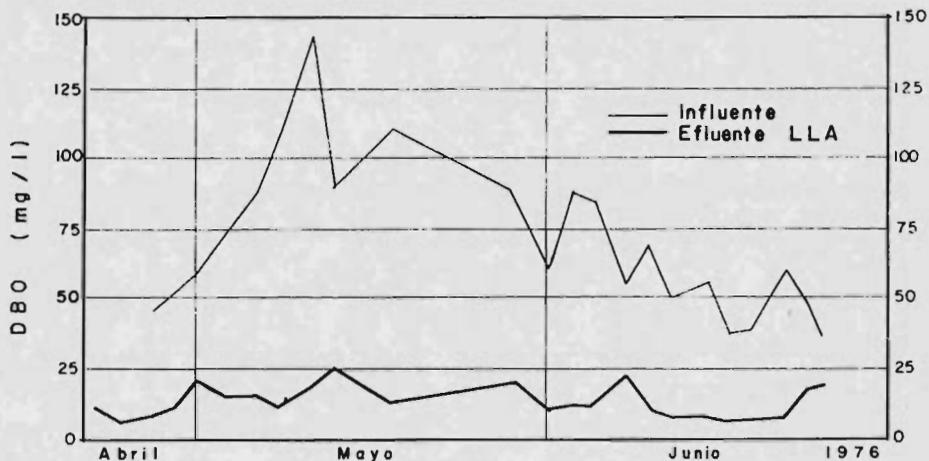
FIG. A-1

FIG. A-2



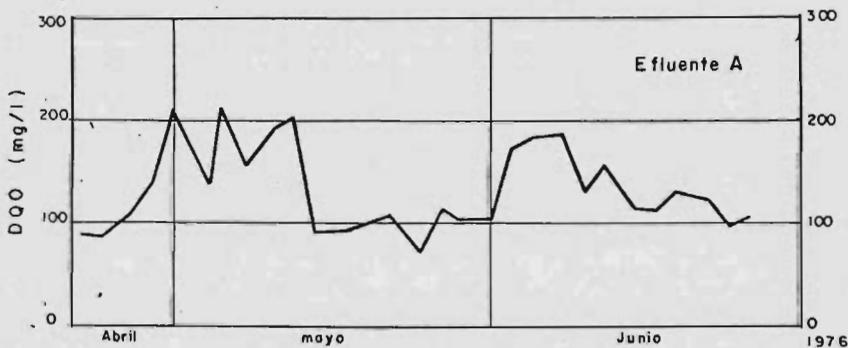
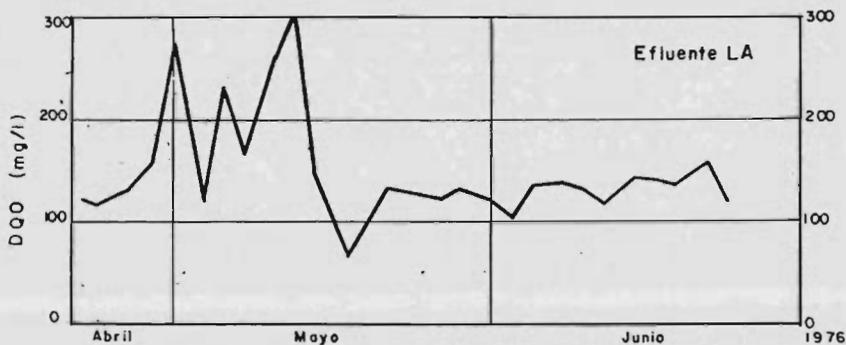
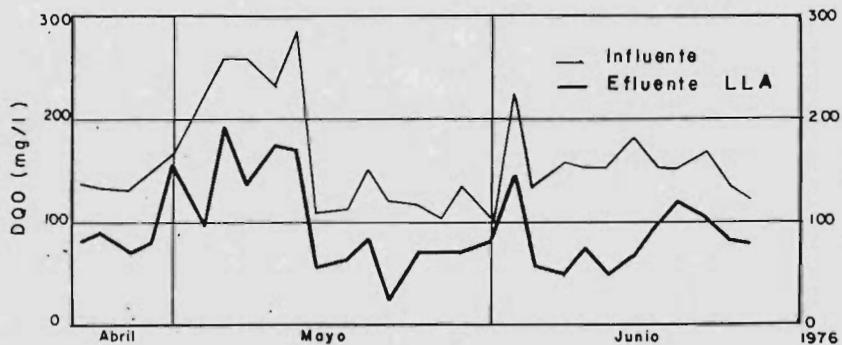
CONDICIONES DE OPERACION DE LOS MODELOS

FIG. A-3



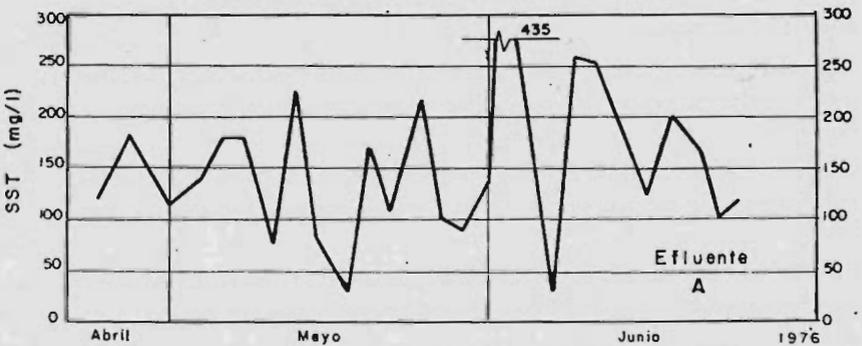
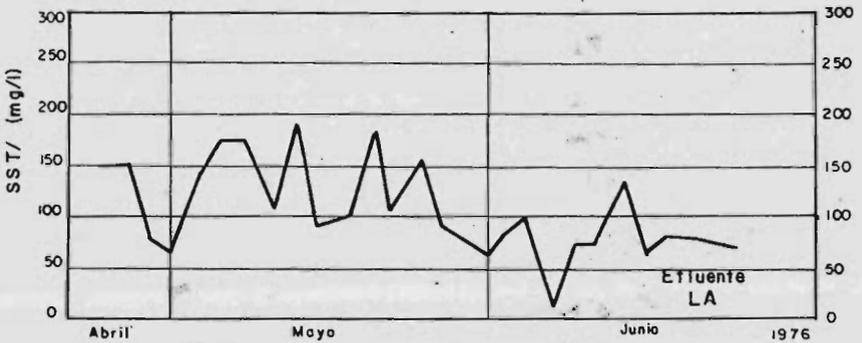
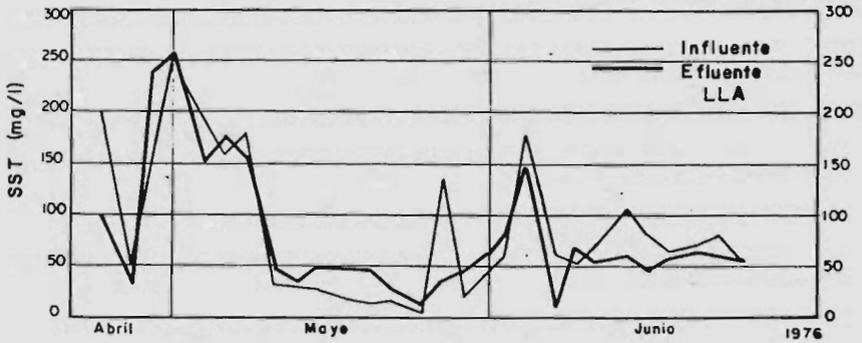
CONCENTRACIONES DE DBO EN EL INFLUENTE
Y EN EL EFLUENTE

FIG. A-4



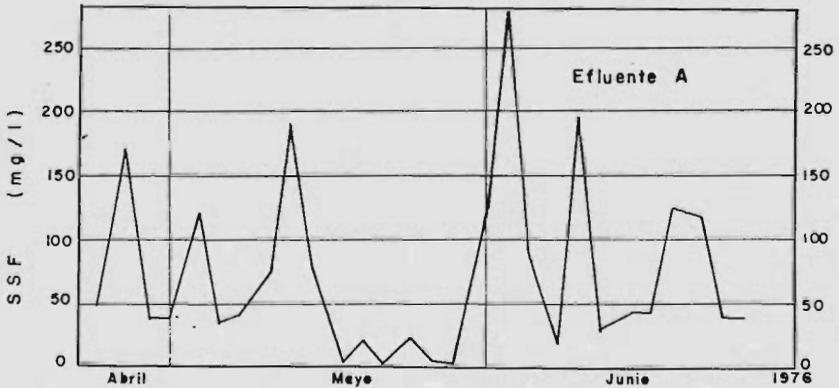
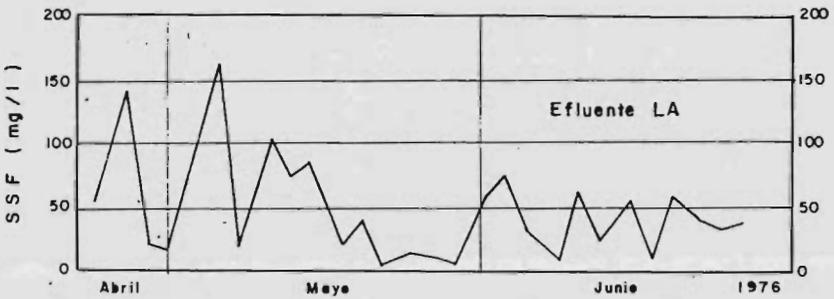
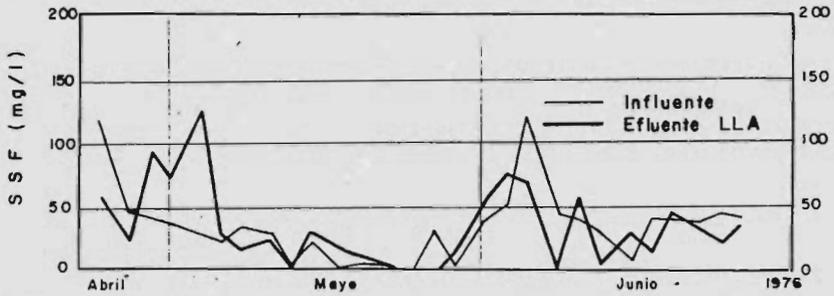
CONCENTRACIONES DE DQO EN EL INFLUENTE
Y EN EL EFLUENTE

FIG. A-5



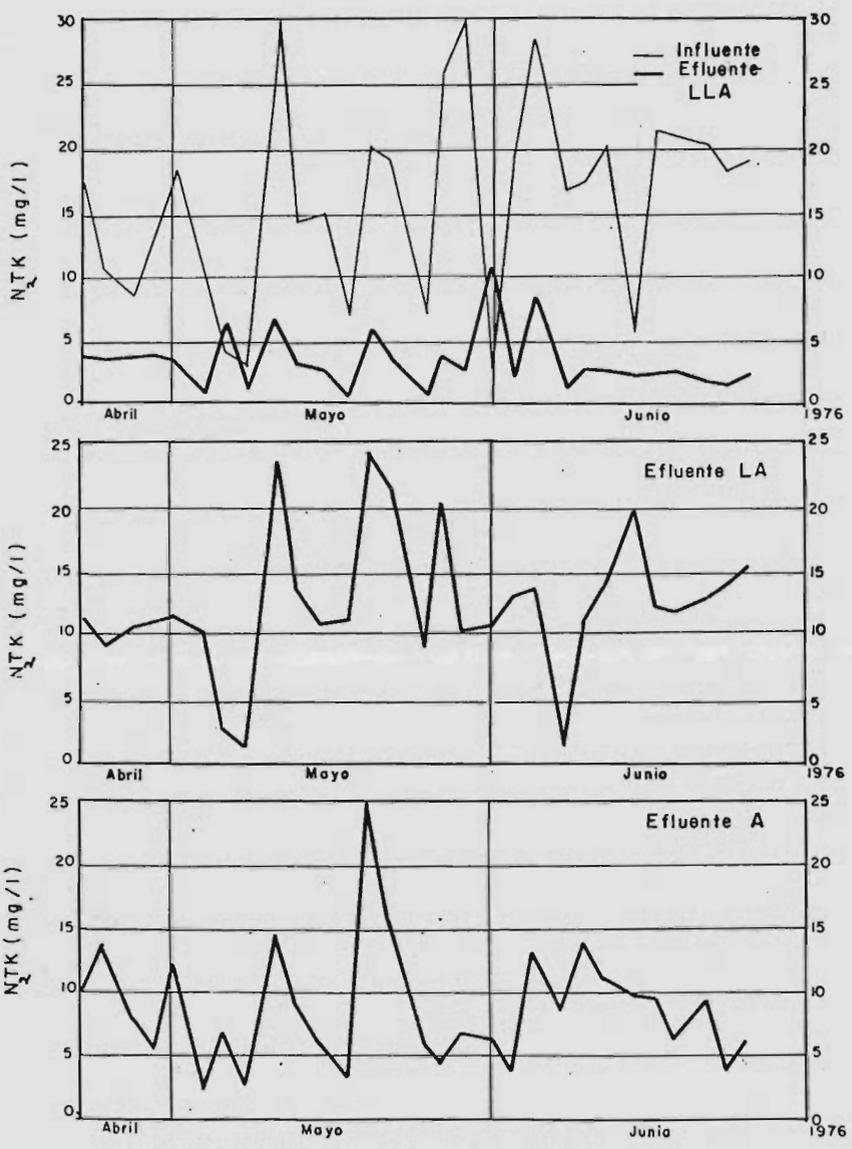
CONCENTRACIONES DE SST EN EL INFLUYENTE Y EL EFLUYENTE

FIG. A-6



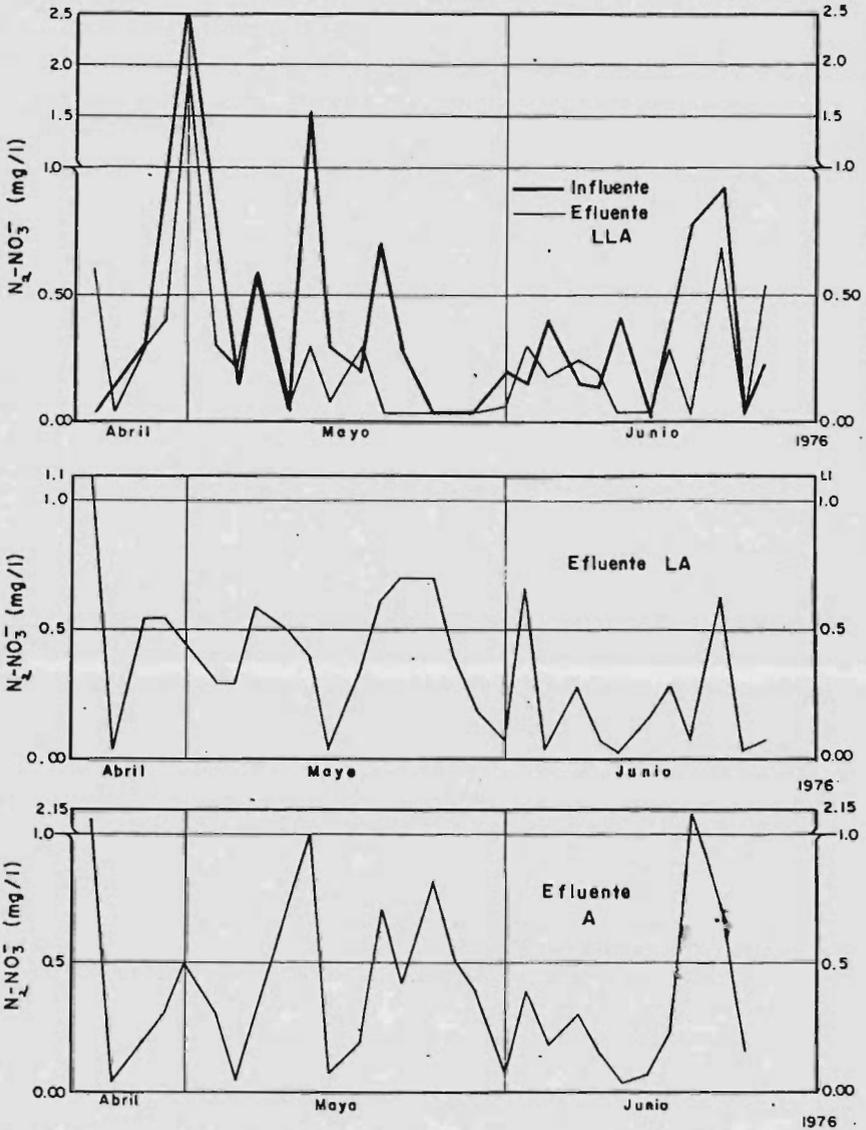
CONCENTRACIONES DE SSF EN EL INFLUYENTE
Y EN EL EFLUYENTE

FIG. A-8



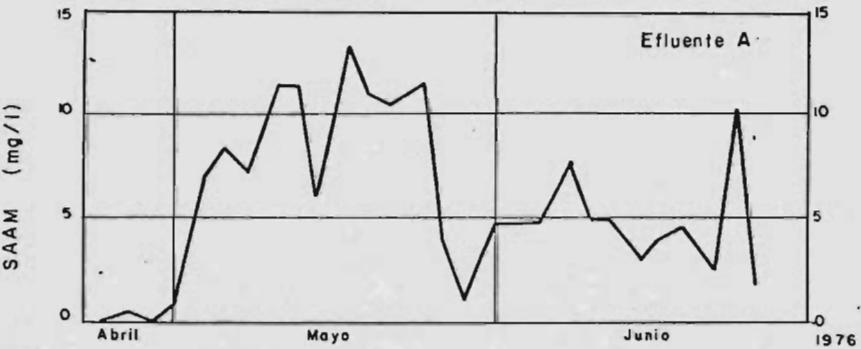
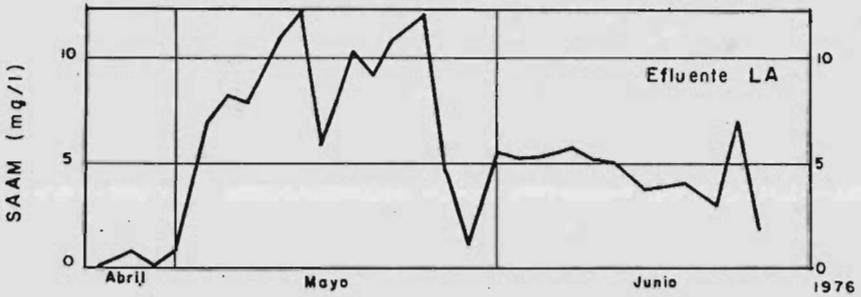
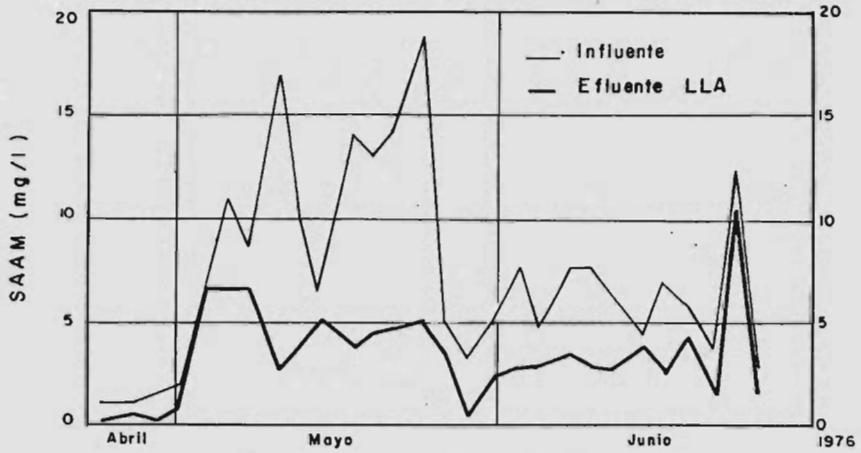
CONCENTRACIONES DE NTK EN EL INFLUENTE
Y EN EL EFLUENTE

FIG. A-9



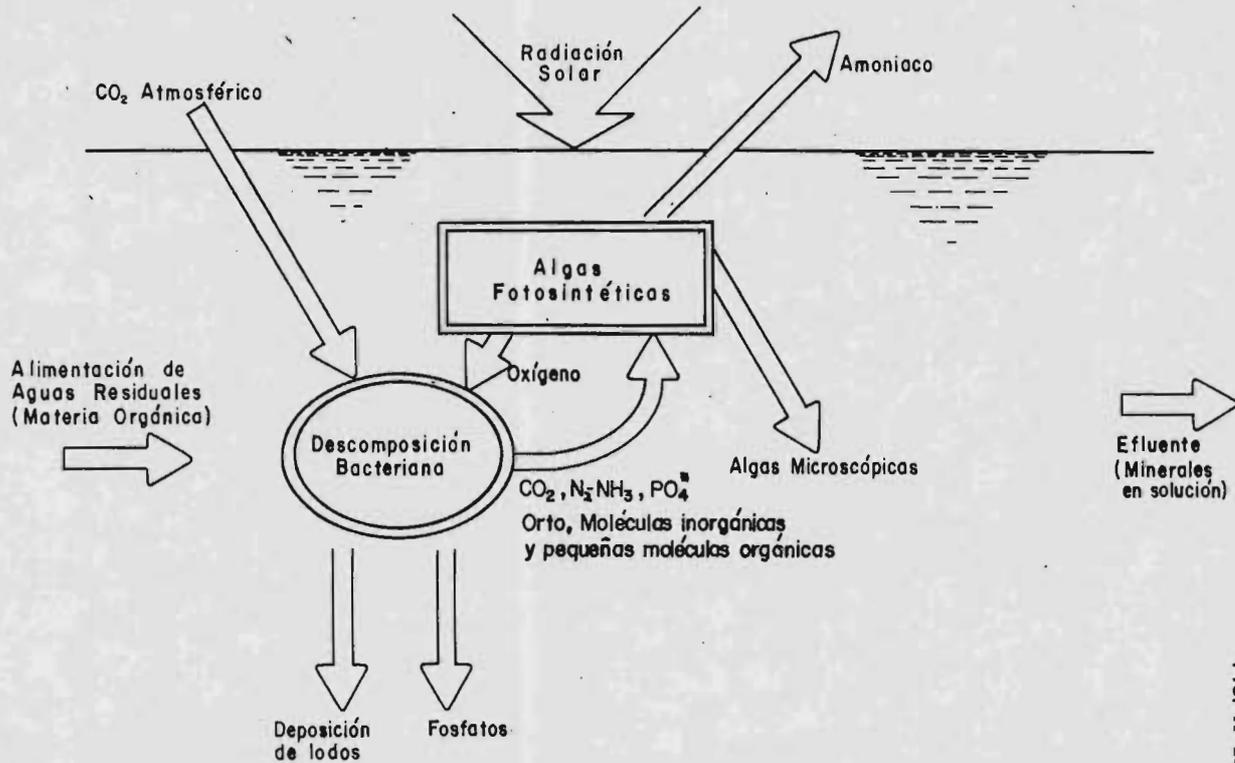
CONCENTRACIONES DE $N_2-NO_3^-$ EN EL INFLUYENTE Y EN EL EFLUYENTE

FIG. A-11



CONCENTRACIONES DE SAAM EN EL INFLUYENTE
Y EN EL EFLUYENTE

ESQUEMA DE LOS PROCESOS BIOQUIMICOS
EN LAS LAGUNAS DE TRATAMIENTO



APENDICE B

CRITERIOS PARA LA CLASIFICACION DE SUELOS

Y TOLERANCIAS EN CULTIVOS

Habiendo presentado en el capítulo III las principales normas y recomendaciones sobre la calidad y límites permisibles del agua con fines de irrigación, y discutido brevemente éstas en función de los resultados experimentales obtenidos en la zona piloto, es objeto del presente apéndice el presentar de una manera más o menos detallada, los principales criterios y normas sobre los cuales se efectuó la evaluación de las condiciones de los suelos y cultivos en la presenta tesis.

B-1 Criterios para la Clasificación de Suelos

B-1-1 Clasificación por Conductividad Eléctrica y PSI.⁽⁸⁵⁾

Esta clasificación toma en cuenta la magnitud de la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo y el % de sodio intercambiable, definiendo cuatro tipos de suelo, a saber:

Suelos Salinos:

Este tipo de suelos presenta una C.E. mayor de 4 mmhos/cm, y un PSI de 0 a 15%. Son reconocidos fácilmente por la presencia de costras blancas de sal sobre la superficie. El sodio, raramente constituye más de la mitad de los cationes. Las cantidades relativas de calcio y magnesio que están presentes en la solución del suelo y en el complejo de intercambio, varían considerablemente. El potasio intercambiable y el soluble son comunmente

constituyentes de menor cuantía; sin embargo, en suelos erosionados o ricos en minerales como biotita o muscovita, éstas formas de presentación del potasio pueden ser abundantes.

Los aniones de mayor importancia son los cloruros, sulfatos y algunas veces los nitratos, presentándose ocasionalmente pequeñas cantidades de bicarbonatos. Los carbonatos solubles rara vez se encuentran. Los suelos salinos, además, pueden contener sales poco solubles, tales como el sulfato de calcio y los carbonatos de calcio y magnesio.

Suelos Salino-Sódicos:

Se caracterizan por presentar una C.E. mayor de 4 mmhos/cm y un PSI mayor de 15%; son el resultado de la combinación de los procesos de salinización y sodificación.

La apariencia y las propiedades son semejantes a las de los suelos salinos; el pH es menor de 8.5, aunque en ocasiones puede ser mayor. Por el exceso de sales, las partículas permanecen floculadas, y de ser lixiviadas, las propiedades de los suelos pueden cambiar marcadamente y volverse similares a los suelos sódicos. Algunas veces los suelos salinos-sódicos contienen yeso, que al lixiviarse, el calcio se disuelve y reemplaza al sodio intercambiable simultáneamente con la remoción de las sales en exceso.

Suelos Sódicos:

Los valores de C.E. y el PSI se encuentran entre 0 y 4 mmhos/cm y más de 15% respectivamente. Se localizan en zonas áridas y semidesérticas en pequeñas áreas irregulares (puntos lisos); su pH varía entre 8.5 y 10. Si el yeso no está presente en los suelos o en las aguas de riego, el drenaje y la lix-

iviación dan lugar a la formación de suelos sódicos. El sodio intercambiable que se encuentra en éste tipo de suelos tiene gran influencia en las propiedades físicas y químicas de los mismos.

Los aniones que están presentes en grandes cantidades son cloruros, sulfatos y bicarbonatos. Los cationes que comunmente se determinan son: calcio, magnesio, sodio y potasio. En el cuadro B-1 se resumen los valores de C.E. y PSI para los suelos descritos, así como los normales que se encuentran entre 0 y 4 mmhos/cm y de 0 a 15% respectivamente.

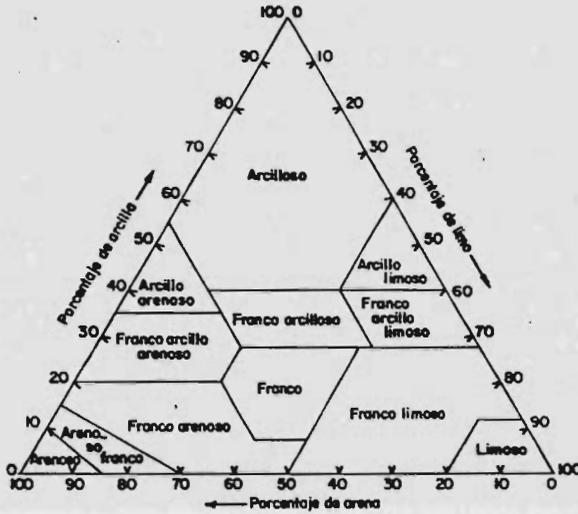
B-1-2 Clasificación por Textura (35)

El término define las características físicas del suelo, dependiendo del tamaño de partícula, pudiendo ser de textura fina a textura gruesa. Se agrupan en un número definido de clases: arenosos, limosos, francos y arcillosos, recibiendo el nombre de la fracción dominante. En la figura B-1, se presenta la clasificación utilizada por la U.S. Soil Survey.

B-1-3 Clasificación por el Contenido de Boro (35)

El boro soluble se encuentra en los extractos de saturación de los suelos salinos en concentraciones que oscilan de 2 a 100 mg/Kg. Es esencial para el crecimiento de las plantas y excesivamente tóxico en concentraciones mayores de 5, 10 y 20 mg/l en el extracto de saturación del suelo, respectivamente, en función de la tolerancia de los cultivos sensibles, semitolerantes y tolerantes.

FIG. B-1



Arena 2-0.05 mm
 Limo 0.05-0.002 mm
 Arcilla <0.002 mm

CLASIFICACION DE SUELOS POR TEXTURA

Ref. "Las condiciones del suelo y el crecimiento de las plantas"
 E. John y E. Walter Russell, Ed. Aguilar, 1968

(55)

B-1-4 Clasificación por RAS

Esta relación se usa para expresar la actividad relativa de los iones de sodio en las reacciones de intercambio. En la figura B-2, se presenta un nomograma para determinar el valor del RAS de un extracto de saturación de suelo y poder inferir el valor del PSI.

B-1-5 Contenido de Micronutrientes ⁽³⁴⁾

En el cuadro B-2, se presentan los valores de concentración de los principales micronutrientes que deben tomarse en cuenta en los análisis de suelos; su contenido se expresa en ppm.

B-2 Necesidades y Tolerancias de Elementos por los Cultivos. ⁽³⁵⁾

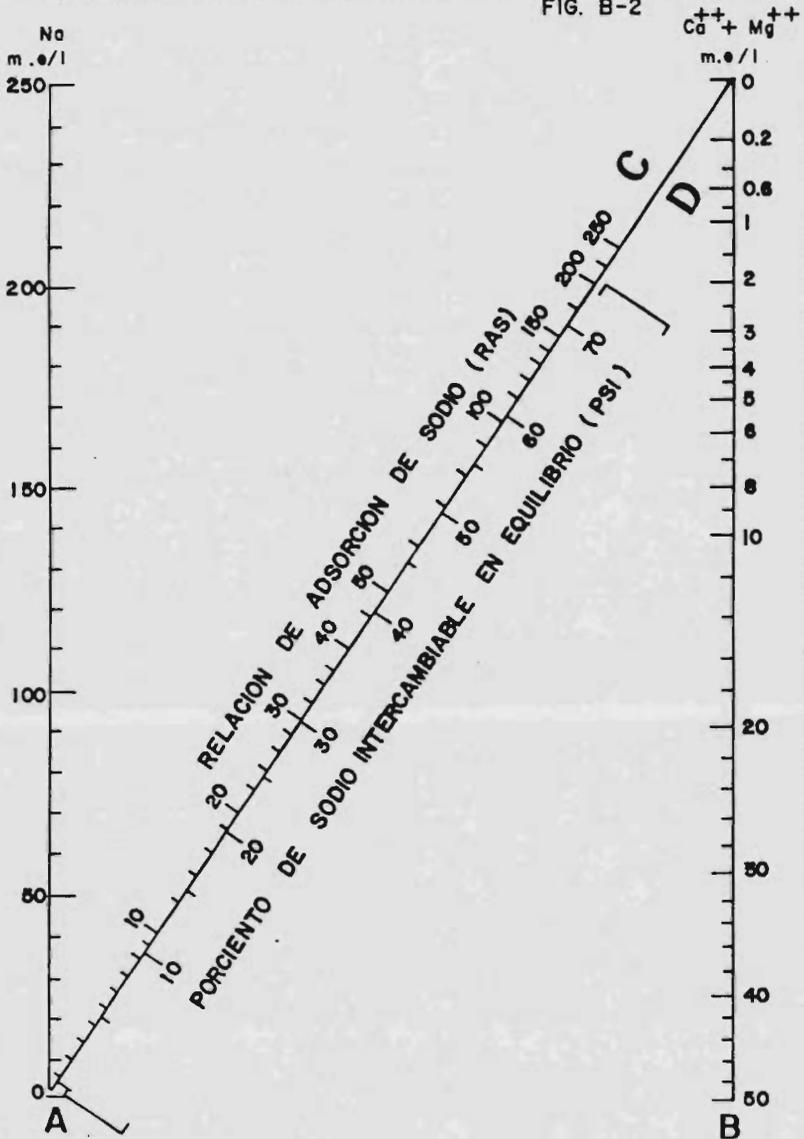
B-2-1 Nitrógeno:

Es esencial para el crecimiento de los vegetales, dado que es un constituyente de todas las proteínas y por consiguiente, del protoplasma. Cantidades excesivas dan hojas con células muy grandes y de pared delgada, siendo fácilmente atacadas por insectos, hongos y por las condiciones climáticas. En algunos cultivos como en los cereales, elevadas cantidades de nitrógeno retrasan la maduración y estimulan el desarrollo de pajas con relación al grano. En cambio, para otros, como el maíz y el sorgo, produce efecto contrario.

B-2-2 Fósforo:

Como ortofosfato desempeña un papel fundamental en un gran número de reacciones enzimáticas que dependen de la fosforización; por ello, es un constituyente esencial del núcleo celular, principalmente en los procesos de

FIG. B-2



Nomograma para determinar el valor RAS de un extracto de saturación y para estimar el valor correspondiente del PSI del suelo, cuando está en equilibrio con el extracto,

Ref.: Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos, Ed. Limusa, Año 1974.

división celular y para el desarrollo de los tejidos meristemáticos. Un exceso de fosfato, sobre la cantidad requerida por los cultivos, disminuye algunas veces los rendimientos.

B-2-3 Azufre:

Constituyente esencial de muchas proteínas; su deficiencia es reconocida como amarillez del té.

B-2-4 Potasio:

Es esencial en la nutrición de las plantas y por lo general se encuentra en pequeñas cantidades, por lo que debe ser agregado como fertilizante. De encontrarse deficiente, las plantas son raquíticas y de hojas muy pequeñas, de color gris y presentan un marchitamiento prematuro. El exceso de potasio que se presenta por las aplicaciones grandes de abonos, reduce la cantidad de otros nutrientes que puede absorber el cultivo.

B-2-5 Calcio:

Es esencial para el crecimiento de los meristemas, y particularmente para el desarrollo y funcionamiento adecuados de los ápices de la raíz. Las deficiencias de calcio se presenta en forma típica sobre los suelos muy ácidos, causando un desarrollo raquítico del sistema radicular, dando una apariencia característica a las hojas. Las cantidades grandes de calcio no tienen efecto perjudicial directo en la mayoría de los cultivos, pero restringen la absorción de magnesio y del potasio.

B-2-6 Magnesio:

Es necesario en todas las plantas dado que es un constituyente de la clorofi-

la y desempeña un papel importante en el transporte de fósforo, por lo cual puede aumentarse algunas veces la riqueza del fósforo al agregar fertilizantes magnésicos. La deficiencia se presenta con frecuencia en suelos arenosos ácidos.

B-2-7 Manganese:

La deficiencia de éste elemento se presenta típicamente sobre suelos calizos, particularmente si el nivel freático es alto, aunque puede presentarse también sobre suelos arenosos neutros y franco ligeros. Su presencia en la avena se refleja como la enfermedad moteada gris; en la remolacha azucarera, por una amarillez y en los guisantes, como manchas negras. El principal factor que domina la accesibilidad del manganeso del suelo es el pH. Cuanto más ácido es, mayor es la accesibilidad del elemento.

B-2-8 Zinc:

Las enfermedades por deficiencia de zinc son de gran importancia en muchos suelos de los E.U., y aparecen típicamente en climas donde se tiene elevada luminosidad; están restringidos a los suelos pesados y a los arenosos que contienen turba. Se ha encontrado que algunas malas hierbas contienen mayor cantidad de zinc que los cultivos, habiendo plantas extractoras de zinc como la alfalfa, encontrándose grandes cantidades del elemento en sus tejidos foliares.

B-2-9 Cobre:

Las funciones del cobre son dos: una relacionada directamente con la nutrición de la planta, y otra relacionada con los caracteres del suelo. La fun-

ción como elemento nutritivo es el resultado de ser éste un constituyente de algunas enzimas. En los suelos que aparece como tal, es decir, donde solamente se requieren abonados poco intensos, es posible que exista una interacción entre las necesidades de zinc y cobre en el sentido que los cultivos pueden responder al zinc si se les estimula con abonados de cobre, más no al contrario.

B-2-10 Sodio:⁽³⁸⁾

Parece no ser un elemento esencial, pero ciertas especies se desarrollan mejor en presencia de sodio cumpliendo algunas funciones propias del potasio. Las especies se han dividido en cuatro grupos con arreglo a sus necesidades relativas del sodio, mismas que se presentan en el cuadro B-5.

B-2-11 Cloruros:⁽³⁸⁾

La mayor parte de las plantas absorbe de la solución del suelo a éste elemento, no habiendo pruebas de que existan suelos en que las cosechas se vean afectadas por falta de cloruros. El ión no tiene efecto específico sobre el desarrollo vegetal, aunque algunas veces adelanta la maduración.

B-2-12 Hierro:⁽³⁸⁾

La deficiencia del hierro se muestra como una clorosis típica, particularmente en suelos calizos. Esta deficiencia puede inducirse, si se cultiva una especie sobre un suelo que contenga una concentración demasiado grande de muchos iones. Así, el cobalto, cobre, cromo, zinc, manganeso y plomo pueden hacer que las plantas muestren los síntomas de deficiencias de hierro, lo mismo que los de la toxicidad específica de aquellos iones.

B-2-13 Molibdeno: ⁽³⁸⁾

Es un elemento que se ha reconocido útil y necesario para las plantas, pero difiere de otros elementos en que las plantas tienen probabilidades de desarrollo satisfactorio sin él. En un medio sin molibdeno, en presencia de nitratos, las plantas los acumulan, por lo que se ha determinado que el molibdeno es esencial para la enzima que facilita la reducción de los nitratos. En el cuadro B-6, se presentan las concentraciones de micronutrientes que deben tener los suelos en estado normal, los ámbitos de deficiencia o exceso y los síntomas de tales estados.

⁽³⁴⁾

B-2-14 Cloruros y PSI:

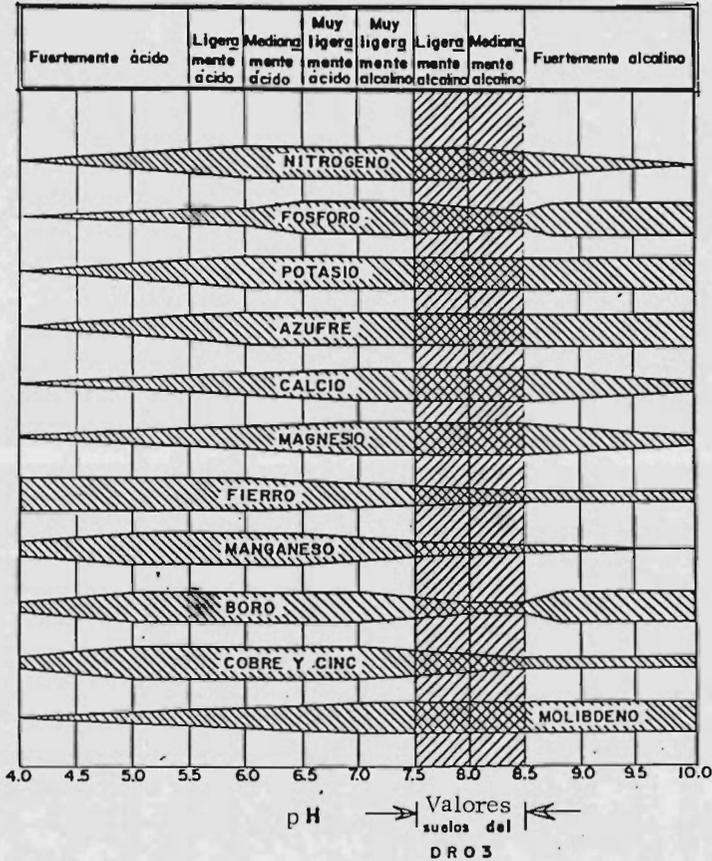
En los cuadros B-7 y B-8 se muestran las tolerancias relativas de los cultivos a tales parámetros presentes en el extracto de saturación de los suelos.

⁽⁸⁶⁾

B-2-15 pH:

En la figura B-3 se indica la influencia que tiene el pH del suelo en el aprovechamiento de algunos nutrientes y micronutrientes donde la solubilidad de éstos en la solución del suelo es función de la alcalinidad o acidez del mismo y con ello la captación por el cultivo.

INFLUENCIA DEL PH DEL SUELO EN EL APROVECHAMIENTO
DE NUTRIMENTOS



Ref.: National Plant Food Institute, Manual de Fertilizantes, Ed. Limusa, Año 1974

CUADRO B-1

CLASIFICACION DE SUELOS EN FUNCION DE LA CONDUCTIVIDAD

ELECTRICA Y EL PORCIENTO DE SODIO INTERCAMBIABLE

Clase de Suelo	Conductividad Eléctrica mmhos/cm	% Na Intercambiable
Normal	0 - 4	0 - 15
Salino	> 4	0 - 15
Sódico	0 - 4	> 15
Salino Sódico	> 4	> 15

Ref.: Suelos Contaminados por sales "Breves Conceptos y Metodología para su Análisis" QFB Luz María Oropeza Mendoza, SRH - 1972, Depto. de Análisis y Laboratorio DGUAPC.

CUADRO B-2

CONCENTRACIONES DE MICRONUTRIENTES

EN SUELOS

Nutrientes	Contenido Total en Suelos
Fierro	1-5 %
Manganeso	100-4 000 ppm
Cobre	2-100 ppm
Zinc	10-30 ppm
Boro	2-100 ppm
Molibdeno	0.2-5 ppm
Cloruros	50-500 ppm

Ref.: Instructivo para el Muestreo, Registro de Datos e Interpretación de la Calidad del Agua para Riego Agrícola Colegio de Postgraduados, ENA, Oscar Palacios y Everardo Aceves N. Año 1970

CUADRO B-3

NUTRIMIENTOS CONTENIDOS EN DIFERENTES CULTIVOS

CULTIVO			Rendimiento t/ha	Nutrimentos (kg/ha)		
	Nombre	Parte		N ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O
C e r e a l e s	Cebada	Grano	0.87	39	1.7	11
		Paja	0.91	17	5.6	34
	Maíz	Grano	4.78	150	60	45
		Rastrojo	3.40	112	41	162
	Avena	Grano	1.16	56	22	17
		Paja	1.82	28	17	90
	Sorgo	Grano	1.82	73	39	22
		Paja	2.74	95	28	140
	Trigo	Grano	1.09	56	28	17
		Paja	1.36	22	5.6	39
H e n o	Alfalfa		3.65	200	45	200
	Trébol Rojo		1.82	90	22	90
	Soya		1.82	101	22	56
F r u t a l i z a s	Col		18	146	39	146
	Cebolla		14	101	45	90
	Papa		141	10.9	34	162
	Espinaca		45	56	17	34
	Tomate		18	134	45	179
	Camote		7.5	50	17	84

Ref.: Manual de Fertilizantes National Plant Food Institute, Ed. Limusa 1974

CUADRO B-4

CANTIDADES DE METALES PESADOS TOMADOS DEL SUELO POR

DIFERENTES CULTIVOS

Cultivo	Nutrimientos en kg/ha tomados del Suelo								Productividad t/ha
	Potasio	Calcio	Magnesio	Azufre	Boro	Cobre	Manganeso	Zinc	
Cebada	45	10.1	44	7.8	0.045	0.044	0.393	0.123	1.78
Maíz	207	31.2	31	27	0.11	0.123	1.8	0.51	8.18
Avena	107	11.2	12.3	15.6	--	0.066	0.13	0.376	2.98
Trigo	56	7.8	11	8.9	0.045	0.044	0.28	0.216	3.45
Alfalfa	200	125	23	21	0.067	0.067	0.49	0.47	3.65
Soya	56	45	20	11	0.011	0.045	0.51	0.17	1.82
Frijol	28	2.2	2.2	5.6	0.13	0.022	0.033	0.067	0.82
Tomate	179	7.8	12	16	0.16	0.079	0.15	0.18	18

Ref.: Manual de Fertilizantes National Plant Food Institute, Ed. Limusa, 1974.

CUADRO B-5

EFFECTO DEL SODIO APLICADO COMO NUTRIENTE

SOBRE DIFERENTES ESPECIES CULTIVADAS

Grado de Beneficio con Deficiencia de Potasio		Grado de Beneficio con Potasio Suficiente	
1.- Ninguno a muy ligero	2.- Ligero a medio	3.- Ligero a	4.- Grande
Alforfón	Cebada	Coles	Apio
Lechuga	Porécol	Col rizada	Remolacha forrajera semiazucarera
Maíz	Coles de Bruselas	Kohlrabi	
Patata	Zanahoria	Mostaza	Remolacha azucarera
Cent eno		Algodón	Rábano
Soya	Avena	Colza	
Espinaca	Guisante	--	Nabo
Fresa	Tomate	--	--
Girasol	trigo	--	--
Alubia blanca			

Ref.: Las condiciones del Suelo y el Crecimiento de las Plantas, Russell, Ed. Aguilar 1968.

CUADRO B-6

CONCENTRACIONES DE MICRONUTRIENTES EN CULTIVOS

Nutriente	Concentración			Síntomas de Deficiencia
	Deficiente	Normal	Exceso	
Fierro ppm	10-80	30-150	No tóxico	Clorosis
Manganeso ppm	5-20	15-100	Depende de la relación Fe:Mn; pudiendo ser 1 000	Clorosis
Cobre ppm	3-5	5-15	> 20, depende de la relación Fe:Cu	Brotos de goma, corteza muy gruesa en los cítricos, - muerte de las ramas del manzano, bajo tergor en las hojas.
Zinc ppm	15	10-50	200-500	Clorosis, reducción del tamaño de hojas, y las hojas en roseta.
Boro ppm	2-15	5-50	75-300	Clorosis, frecuentemente rojizo, cortos internodos, separación de flores, tejido corchoso y el corazón de la remolacha podrido.
Molibdeno ppm	0.1-0.3	1-100	Generalmente no tóxico en las plantas	Síntomas de deficiencia de N, en legumbres, manchas amarillas en las hojas de los cítricos.
Cloruros %	0-2	0.2-1.0	0.5-2.5	Raíces cortas y gruesas, marchitamiento de las plantas, algo de clorosis en hojas recientes.

Ref.: Soil Science Principles and Practices, R.L. Hausenbuiller, 1973

CUADRO B-7

TOLERANCIA DE CULTIVOS A LA CONCENTRACION
DE CLORUROS

C u l t i v o	Concentración permisible de cloruros en el extracto de saturación del suelo en me/l
Limonero	25
Mandarina	25
Naranja agrio	15
Naranja dulce	10
Frutales de hueso	7-25
Aguacate	5-8
Vid sin semilla	25
Vid rosa negra	10
Zarzamora	10
Frambuesa	5
Fresa Larssen	3
Fresa Shasta	5

Ref.: Instructivo para el Muestreo, Registro de Datos e Interpretación de la Calidad del Agua para Riego Agrícola, Colegio de Postgraduados, ENA, Oscar Palacios V, y Everardo Aceves N. Año 1970

CUADRO B-8
TOLERANCIA DE CULTIVOS AL PORCENTAJE
DE SODIO INTERCAMBIABLE

Variación de PSI que Afecta el Desarrollo	PSI	Cultivo	Respuesta en el Crecimiento bajo Condiciones de Campo
Extremadamente sensibles	2-10	Frutales, deciduos nuez, cítricos y aguacate	Síntoma de toxicidad de sodio a bajo PSI
Sensibles	10-20	Frijol	Desarrollo limitado a bajo PSI
Moderadamente sensibles	20-40	Trébol, avena, arroz	Desarrollo limitado por factores de nutrición
Tolerantes	40-60	Trigo, algodón, alfalfa, cebada, jitomate	Desarrollo limitado generalmente debido a estructura, desfavorable

Ref.: Instructivo para el Muestreo, Registro de Datos e Interpretación de la Calidad del Agua para Riego Agrícola, Colegio de Postgraduados, ENA, Oscar Palacios V. y Everardo Aceves N. Año 1970

REFERENCIAS

- 1 La Política Industrial en el Desarrollo Económico de México, Nacional Financiera, S.A. y Comisión Económica para la América Latina, CEPAL, 1971.
- 2 Lees, Norman D., Localización de Industrias en México, Banco Nacional de México, Departamento de Investigaciones Industriales. Imp. Modernas, S.A., 1971.
- 3 Estrategia y Costos para el Control de la Contaminación del Agua en México, Plan Nacional Hidráulico, S. R. H., México, 1975.
- 4 Ecología y Salud, Colección Salud, Secretaría de Salubridad y Asistencia. México, 1974.
- 5 Información Panorámica-Resumen, Plan Nacional Hidráulico, S. R. H., México, 1973.
- 6 Aguirre M., Jorge. Simposio sobre Usos del Agua en México, Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación, S. R. H. México, 1974.
- 7 Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Adecuados a las Condiciones Nacionales, Segunda Etapa. DGUAPC, S. R. H. México, 1975.
- 8 Reuso del Agua en la Industria. DGUAPC, S. R. H. México, 1974.
- 9 Consumos de Agua, Censo de Manufacturas. Industrial Water Use, Department of Commerce, Washington, USA, 1954.
- 10 Estadística Agrícola. Dirección General de Distritos de Riego, S. R. H. México, 1971.
- 11 Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos. 1970-1971. Secretaría de Industria y Comercio, Dirección General de Estadística.
- 12 Legislación Relativa al Agua y su Contaminación. S. R. H. México, 1971.
- 13 Sistemas Económicos de Tratamiento de Aguas Residuales Adecuados a las Condiciones Nacionales, Tercera Etapa. DGUAPC, S. R. H. México, 1976.

- 14 Uso del Agua en la Industria; Evaluación de la Situación Regional Actual y Estimación de la Demanda en 1980 para la Industria de la Transformación. Plan Nacional Hidráulico, S. R. H. México, 1973.
- 15 La Economía Mexicana en Cifras. Nacional Financiera, S. A. México, 1974.
- 16 Estudio sobre Usos del Agua en la Industria Azucarera. DGUAPC, S. R. H. México, 1974.
- 17 Estudio sobre Usos del Agua, Métodos y Costos para el Control de la Contaminación del Agua Residual en la Industria de la Celulosa y el Papel. DGUAPC, S. R. H. México, 1974.
- 18 Estudio sobre Usos del Agua en la Industria del Hierro y del Acero. DGUAPC, S. R. H. México, 1974.
- 19 Industrial Wastes. Vol 12, Nov-Dic 1973. E. U. A.
- 20 Estudio sobre Usos del Agua en la Industria Química. DGUAPC, S. R. H. México, 1975.
- 21 Nordell, E. Water Treatment for Industrial and other Uses, 2^o Ed. Reinhold Pub. Co. N. Y. EUA, 1961.
- 22 Recomendaciones sobre Calidades de Agua para Calderas Clayton de México, S. A.
- 23 Journal American Water Works Association. Vol: 62, Mar 1970. Water Reuse & Recycling in Industry. Eller, J. E. y Gloyna, F.
- 24 Water Quality Criteria. ASTM, STP 416, Water for Industrial Processes. Partridge, E. P. Am. Soc. Testing Mats. USA, 1967.
- 25 Recomendaciones sobre Calidad de Agua para Calderas de Sociedad Electromecánica, S. A. México.
- 26 Estudio para el Aprovechamiento en la Industria, de las Aguas Residuales del Emisor del Poniente en la Zona N-Z-T. Jefatura de Agua Potable y Alcantarillados, S. R. H. México, 1970.
- 27 Uso del Agua en la Industria Petrolera. DGUAPC, S. R. H. México, 1975.
- 28 Statewide Standards for the Safe Direct Use of Reclaimed Waste Water for Irrigation and Recreational Impoundments. Calif. Administrative Co. Title 17, Public Health, Department of Public Health, EUA, 1973.
- 29 Reglamento Sanitario Provisional sobre la Construcción y Explotación

- de Campos Agrícolas y de Regadío para hacer Inofensivas y Aprovechar las Aguas Negras en la URSS. Viceministerio de Agricultura de la URSS; Traducción de la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, S. R. H., Reg. No. 377. México, 1957.
- 30 Wilcox, L. V. Clasificación and Use of Irrigation Water. US. Salinity Lab., Circular 969, U.S. Department of Agriculture, 1965.
- 31 Urroz, J. Eloy. Calidad del Agua para Diversos Usos: Doméstica, Industrial, Agrícola, Piscícola y Recreativo. Curso de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales y Municipales, Centro de Educación Continua, U. N. A. M. 1973.
- 32 Uso Agrícola de las Aguas Negras. Pub: 9/70. CHCVM, S. R. H. México, 1970.
- 33 Water Quality Criteria. U.S. Federal Water Pollution Control Administration. E.U. 1968.
- 34 Palacios, V. O. y Aceves, N. E. Instructivo para el Muestreo, Registro de Datos e Interpretación de la Calidad del Agua para Riego Agrícola. Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, México, 1970.
- 35 Russell, E. J. y Russell, W. E. Las Condiciones del Suelo y el Crecimiento de las Plantas. Ed. Aguilar. Madrid, 1968.
- 36 Heavy Metals in Wastewater. Water Pollution Control Federation Journal, Vol: 45, No. 9. EUA, 1973.
- 37 Faust, S. D. y Osman, M. A. Water Pollution by Organic Pesticides. Journal AWWA, Vol: 56. Marzo 1964.
- 38 Hausenbuiller, R. L. Soil Science, Principles and Practices. N. M. C. Brown Co. Pub. EUA, 1973.
- 39 Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater. 13^o Ed. APHA, AWWA & WPCF. Washington, D. C. 1971.
- 40 Samplón, Sabino. Diez Temas sobre Suelos. Ministerio de Agricultura Madrid, 1968.
- 41 Estudio Económico y Financiero para el Distrito de Control de la Contaminación en CIVAC, Mor. Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación, S. R. H.. México, 1976.

- 42 Reutilización del Agua en la Agricultura, Industria, los Municipios y en la Recarga de Acuíferos, Primera Etapa, Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación, S. R. H. México, 1974
- 43 Reuso del Agua en la Agricultura, Segunda Etapa. Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación, S. R. H. México, 1975.
- 44 Determinación de Boro en el Distrito de Riego 03. Dirección General de Distritos de Riego, S. R. H. México, 1970.
- 45 Los Planes para el Drenaje Sanitario y Pluvial, la Prevención contra Inundaciones y el Control de Avenidas en la Unidad Urbano-Industrial N Z T y la Zona Poniente de la Cd. de México. Publicación 6/62 de la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, S. R. H.
- 46 Harkins, D.R. An Objective Quality Index. Water Pollution Control Federation. Vol. 46 No. 3. E.U.A. 1974.
- 47 Datos Hidrométricos del Gran Canal de Desagüe y Operación de Presas y Canales del DR-03. Estadísticas varias recopiladas en la Dirección de Hidrología, Depto. de Hidrometría, S. R. H.
- 48 Spangles, F.L. ; William, E S. y Fetter, C.W. Artificial and Natural Marshes as Wastewater Treatment Systems in Wisconsin. Freshwater Wetlands and Sewage Effluent Disposal: Ecosystem Impacts, Economics and Feasibility. Univ. de Michigan, Ann Arbor. E.U.A., 10, 11 de mayo de 1976.
- 49 Gloyna, Ernest. Estanques de Estabilización de Aguas Residuales. Organización Mundial de la Salud, Ginebra, 1973.
- 50 Metcalf and Eddy. Wastewater Engineering. Mc. Graw Hill Book Co. E. U. A., 1972
- 51 Wilcox, L. V. The Quality of Water for Irrigation Use. U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin No. 962. E. U. A., 1948.
- 52 Chapman, D.H. and Pratt, F.P. Methods of Analysis for Soil, Plants and Waters. Univ. of California, Div. of Agricultural Sciences, E. U. A., 1961.
- 53 Piper, C.S. Soil and Plant Analysis. N.Y. Interscience. E.U.A., 1961.
- 54 Lunt, H. A. , Jacobson, H.G. , Swanson, C.L. El Sistema Morgan para el Análisis de Suelos. Boletín 541. Est. Exp. Conn., N. Haven, U.S.A. Traducción mimeografiada del Dpto. de Suelos de la E.N.A. Chapingo.

- 55 Suelos Salinos y Sódicos. Departamento de Agricultura de E.U.A. Ed. Limusa, México, 1974.
- 56 Amezcua, C.J. El Problema de los Nutrientes en el Agua y las Alternativas de Remoción. Revista Protección de la Calidad del Agua. Vol. 11, No. 2. México, 1976.
- 57 Fassbender, H.W. Química de Suelos. Inst. Interamericano de Ciencias de la OEA. 1975.
- 58 Goldwater, J.L. Mercury in the Environment. Scientific American, Vol. 224, No. 5. E.U.A., 1971.
- 59 Lish, D.J. Trace Metals in Soils, Plants and Animals. Advances in Agronomy, 24:267-311. E.U.A., 1972
- 60 Parada, Efrén. Determinación de los Contenidos de Plomo en Alimentos Enlatados. IPN, México, 1975
- 61 Van Middelem, G.H. Fate and Persistence of Organic Pesticides in the Environment. Adv. Chem. Series. No. 60. E.U.A. 1966.
- 62 Olson, T.A. Pollution and Marine Ecology. Interscience Pub. E.U.A. 1967.
- 63 Barberá, Claudio. Pesticidas Agrícolas. Ed. Omega, 2a. Edición, México, 1974.
- 64 Environmental Science and Technology. DDT Reuse. Vol. 8, E.U.A. 1974.
- 65 Franco, B.R. Coliform Concentrations in Vegetables Irrigated with Sewage. Tesis de Doctorado, Univ. de Oklahoma, E.U.A. 1971.
- 66 Metcalf and Eddy. Land Treatment of Municipal Wastewater Effluents. U.S. Environmental Protection Agency. E.U.A., 1975.
- 67 Ordoñez, B.R. y Salcedo, N. Investigación Epidemiológica sobre la Contaminación Biológica de Verduras en el D.F. y su posible Desinfección. Subsecretaría del Mejoramiento del Ambiente, S.S.A. y Facultad de Química, U.N.A.M. Abr. 1973. México, Sin publicar.
- 68 Reutilización del Agua en la Agricultura, Industria, los Municipios y en la Recarga de Acuíferos, Tercera Etapa. Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación. S.R.H., México, 1977.

- 69 Dinges, W.R. Who Says Sewage Treatment Plants Have to be Ugly?. Water and Wastes Engineering. E.U.A., Jul 1976.
- 70 Wolverson, B.C., McDonald R.C. y Gordon, J. Water Hyacinths and Alligator Weeds for Final Filtration of Sewage. NASA Technical Memorandum TM-X-72720, Feb. 1975, E.U.A.
- 71 Wolverson, B.C., McDonald, R.C. Water Hyacinths for Upgrading Sewage Lagoons to Meet Advanced Wastewater Treatment Standards: Part I. NASA Technical Memorandum TM-X-72729, Oct. 1975 E.U.A.
- 72 Wolverson, B.C. Water Hyacinths for Removal of Phenols from Polluted Waters. NASA Technical Memorandum TM-X-72727. May. 1975 E.U.A.
- 73 Wolverson, B.C., McDonald, R.C. Water Hyacinths and Alligator Weeds for Removal of Silver, Cobalt and Strontium from Polluted Waters. NASA Technical Memorandum TM-X-72727. May. 1975. E.U.A.
- 74 Wolverson, B.C. Water Hyacinths for Removal of Cadmium and Nickel from Polluted Waters. NASA Technical Memorandum TM-X-72721. Feb. 1975. E.U.A.
- 75 Wolverson, B.C., McDonald, R.C. Water Hyacinths and Alligator Weeds for Removal of Lead and Mercury from Polluted Waters. NASA Technical Memorandum TM-X-72723. Abr. 1975. E.U.A.
- 76 Wolverson, B.C., McDonald, R.C. y Gordon, J. Bioconversion of Water Hyacinths into Methane Gas: Part I. NASA Technical Memorandum TM-X-72725. Jul. 1975. E.U.A.
- 77 Wolverson, B.C. McDonald, R.C. y Barlow, R.M. Application of Vascular Aquatic Plants for Pollution Removal, Energy and Food Production in a Biological System. NASA Technical Memorandum TM-X-72726. May. 1975. E.U.A.
- 78 Wolverson, B.C. Aquatic Plants for Removal of Mevinphos from the Aquatic Environment. NASA Technical Memorandum TM-X-72720. Feb. 1975. E.U.A.
- 79 de Jong, J. Bulrush and Reed Ponds. International Conference on Biological Water Quality Improvement Alternatives. 3 a 5 de Marzo de 1975, Philadelphia, E.U.A.
- 80 Dunigan, E.P., Pelham, R.A. y Shamsuddin, Z.H. Use of Water Hyacinths to Remove Nitrogen and Phosphorus from Eutrophic Waters. Hyacinths Control Journal, Vol. 13, Jun. 1975. E.U.A.

- 81 Ornes, W.H., Sutton, D.L. Removal of Phosphorus from Static Sewage Effluent by Waterhyacinth. Hyacinth Control Journal, Vol13, Jun. 1975, E.U.A.
- 82 Boletín Hidrológico de la S.R.H. Estación Hidrométrica de la Cd. Universitaria, D.F.
- 83 Murguía Vaca, E. Lagunas de Estabilización. Apuntes de la Div. de Estudios Superiores de la Fac. de Ingeniería de la UNAM. 1966.
- 84 Curds, C., Hawkes, H. Ecological Aspects of Used Water Treatment. Vol. I. Academic Press. Londres, 1975.
- 85 Oropeza, M. Luz Ma. Suelos Contaminados por Sales, Breves Conceptos y Metodología para su Análisis. Secretaría de Recursos Hidráulicos. México, 1972.
- 86 Manual de Fertilizantes. National Food Institute. Ed. Limusa. México, 1974.