

24



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
CAMPUS ARAGÓN**

**“EL AGUA RESIDUAL TRATADA COMO  
ALTERNATIVA PARA LA RECARGA  
ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO ”**

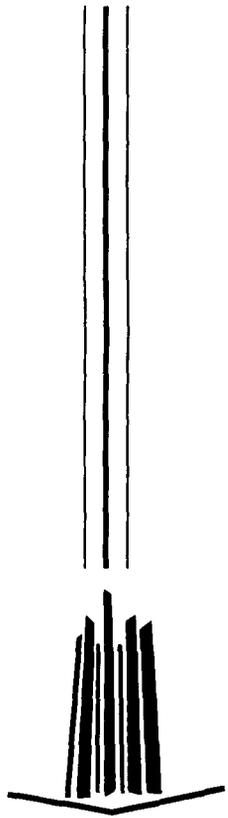
**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERÍA CIVIL**  
P R E S E N T A :  
**MANUEL EDGAR LUNA MEDINA**

ASESOR: ING. GILBERTO GARCÍA SANTAMARÍA GONZÁLEZ

NEZAHUALCOYOTL, ESTADO DE MÉXICO

2002

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGÓN

DIRECCIÓN

DUPLICADO

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**MANUEL EDGAR LUNA MEDINA  
P R E S E N T E**

En contestación a su solicitud de fecha 12 de julio del 2001, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. GILBERTO GARCÍA SANTAMARÍA GONZÁLEZ, pueda dirigirle el trabajo de tesis denominado "EL AGUA RESIDUAL TRATADA COMO ALTERNATIVA PARA LA RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**  
San Juan de Aragón, México 12 de septiembre de 2002  
**LA DIRECTORA**

*L. Luna Medina*  
**ARQ. LILIA TURCOTT GONZÁLEZ**



Nota: La aceptación del tema de tesis y asesor de la misma fue registrada en la Secretaría Académica de esta Escuela con fecha 13 de agosto del 2001.

- C p Secretaría Académica.
- C p Jefatura de la Carrera de Ingeniería Civil.
- C p Asesor de Tesis.

LTG/AIR/cma\*

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARAGÓN  
SECRETARÍA ACADÉMICA

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**Ing. MA. DE LOS ÁNGELES SÁNCHEZ CAMPOS**  
**Jefe de la Carrera de Ingeniería Civil,**  
**Presente:**

En atención a la solicitud de fecha 26 de agosto del año en curso, por la que se comunica que el alumno MANUEL ÉDGAR LUNA MEDINA, de la carrera de Ingeniero Civil, ha concluido su trabajo de investigación intitulado "EL AGUA RESIDUAL TRATADA COMO ALTERNATIVA PARA LA RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO", y como el mismo ha sido revisado y aprobado por usted, se autoriza su impresión; así como la iniciación de los trámites correspondientes para la celebración del Examen Profesional.

Sin otro particular, reitero a usted las seguridades de mi atenta consideración.

**Atentamente**  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**  
**San Juan de Aragón, México, 26 de agosto del 2002**  
**EL SECRETARIO**

  
**LIC. ALBERTO IBARRA ROSAS**

C p Asesor de Tesis.  
C p Interesado...

AIR/vr



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## AGRADECIMIENTOS:

### A TI PADRE MIO:

Porque jamás me has abandonado, por bendecirme al haberme puesto en un hogar maravilloso al nacer, por ponerme junto a excelentes personas que han compartido conmigo gran parte de sus vidas y por darme la oportunidad de caminar hacia la perspectiva de un nuevo día

GRACIAS MADRE MIA VIRGEN DE GUADALUPE.

### A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO:

Mi otra casa, que me ha visto crecer como persona y como estudiante profesional, más de una vez aprendiendo que la UNAM es más que solo una escuela con profesores y alumnos. Sin lugar a duda este día bajo no podría haberse realizado sin la formación que recibí en la E. N. E. P. CAMPUS ARAJÓN.

Gracias a todos los profesores y compañeros de carrera que contribuyeron en mi formación.

### A TI MAMA:

Por todo el amor y sacrificio que me has brindado

Tu ejemplo, esfuerzo y desvelos han sabido fomentar en mí, el valor de la responsabilidad.

Eres mujer prodigiosa, quiero agradecerte y expresarte lo mucho que te admiro.

Gracias Mami, gracias Papi

### A MIS HERMANOS:

Joelo, Lulu, Celia y Cesaro, por su cariño, apoyo y comprensión

Por tener la paciencia ante mis dudas de novato y por escuchar atentamente los problemas que a lo largo de esta Tesis surgieron. Recuerden que "...una duda puede más que una razón"

### ATI NOHEMI:

Por creer en mí, que durante bastante tiempo has tenido la paciencia suficiente para apoyarme profundamente, por darme tu comprensión, tu cariño y amor. T.O.M.

### A MI ASESOR:

ING. Gilberto García Santamaría González

Por su orientación para la realización de esta tesis, apoyo y consejos, que siempre tomare en cuenta

### A MIS AMIGOS:

Ficcio, Omar y Gilberto, por esos momentos inolvidables de risas sin sentido y buenos partidos de básquetbol, gracias por su sincera amistad.

### DEDICATORIA ESPECIAL:

Para mis tres queridos pequeños, Aldo Yagoslav, Jesús Alexander y Karla, que este logro de alguna forma sirva de ejemplo para fomentar su deseo de superación.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**EL AGUA RESIDUAL TRATADA COMO ALTERNATIVA PARA  
LA RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUIFERO.**

**INDICE**

INDICE	1
INTRODUCCION	4
ANTECEDENTES	7
<b>I.- BALANCE GEOHIDROLOGICO DE LA ZMCM</b>	<b>9</b>
1.1 AREA Y POZOS CONSIDERADOS EN EL BALANCE	9
1.2 GASTOS Y VOLÚMENES DE EXTRACCIÓN	11
1.3 RECARGA POR FLUJO SUBTERRANEO	17
1.4 RECARGA POR DRENADO VERTICAL	18
1.5 METODOLOGIAS PARA EL CALCULO POR DRENADO VERTICAL	19
1.6 ECUACION DE BALANCE VOLUMETRICO	21
1.7 DRENADO DE LAS ARCILLAS	22
1.8 SUBSISTEMA ACUIFERO DE LA CIUDAD DE MEXICO	23
1.9 VALLE DE TEXCOCO	24
1.10 VALLE DE CHALCO.	25
<b>II.- PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN DEL D.F. Y 27 MUNICIPIOS CONURBADOS</b>	<b>26</b>
II.1 GENERALIDADES	26
II.2 MATRIZ DE LESLIE	27
II.2.1 APLICACIÓN AL D.F	28
II.2.2 APLICACIÓN A LOS 27 MUNICIPIOS CONURBADOS AL D.F	30
II.3 MÉTODO DE INTERES COMPUESTO	34
II.3.1 APLICACIÓN AL CASO DEL D.F	35
II.3.2 APLICACIÓN A LOS 27 MUNICIPIOS CONURBADOS AL D.F	36
II.4 RESULTADOS GLOBALES	38

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



<b>III.- DESCRIPCION DE SISTEMAS DE RECARGA ARTIFICIAL</b>	<b>40</b>
III.1 RECARGA ARTIFICIAL	40
III.2 REFARGA EN SUPERFICIE	42
III.3 RECARGA EN PROFUNDIDAD	48
<b>IV.- FUENTES DE CAPTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA RESIDUAL</b>	<b>51</b>
IV.1 HISTORIA	51
IV.2 ORIGEN DEL AGUA RESIDUAL	52
IV.3 TRANSPORTE DE AGUAS RESIDUALES	52
IV.4 RECOLECCION DE AGUAS RESIDUALES EN LA ZMCM	53
IV.5 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	55
IV.6 REUTILIZACION Y RECICLAJE DE AGUA	55
<b>V.- ACONDICIONAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES PARA RECARGA</b>	<b>62</b>
V.1 CALIDAD DEL AGUA PARA LA RECARGA	63
V.2 ESTANDARES DE CALIDAD DEL AGUA PARA LA RECARGA	63
V.3 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	64
<b>VI.- RECARGA ARTIFICIAL AL ACUIFERO</b>	<b>67</b>
VI.1 GENERALIDADES	67
VI.2 ZONAS APROPIADAS PARA RECARGA	68
VI.3 METODOS DE RECARGA APLICABLE A LA CIUDAD DE MÉXICO	69
VI.4 DISPONIBILIDAD DE AGUA PARA RECARGA ARTIFICIAL	70
VI.5 RECARGA CON AGUA TRATADA	71
VI.6 CRITERIO DE DISEÑO PARA EL EMPLEO DE POZOS	76
VI.7 CRITERIO DE DISEÑO PARA EL EMPLEO DE ESTANQUES INFILTRACION	76

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



<b>VII.- ESTUDIO TIPO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA LA RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUIFERO</b>	<b>77</b>
VII.1 EL ACUIFERO DEL VALLE DE MÉXICO	77
VII.2 INFRAESTRUCTURA PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL	79
VII.3 ANALISIS DE ALTERNATIVAS DE UN PROCESO DE TRATAMIENTO	81
VII.3.1 DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DE CALIDAD DE AGUA DEL ACUIFERO	81
VII.3.2 DETERMINACION DEL TIPO DE RECARGA AL ACUIFERO (INYECCION, INFILTRACION)	83
VII.3.3 DEFINICION DE ALTERNATIVAS DE UN PROCESO DE TRATAMIENTO AVANZADO	83
VII.4 ESQUEMAS DE LOS COMPONENTES QUE CONFORMAN UN PROCESO DE TRATAMIENTO	96
<b>VIII.- BENEFICIOS, RIESGOS Y CATASTROFES DE LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUIFEROS CON AGUAS RESIDUALES</b>	<b>99</b>
<b>CONCLUSIONES GENERALES</b>	<b>102</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>104</b>
GLOSARIO DE TERMINOS Y ABREVIATURAS	105
PROGRAMA, MATRIZ DE LESLIE (Q BASIC)	112
TABLAS Y ESQUEMAS	116
NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994	117
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>118</b>



## INTRODUCCIÓN.

El agua dulce se ha convertido en uno de los factores más importantes del desarrollo mundial. Por ésta razón será el problema ambiental y político más decisivo que te tendrán que enfrentar millones de personas.

La contaminación de las corrientes de aguas es más evidente como fruto de las diversas actividades económicas y el crecimiento de los asentamientos humanos; así como también, las aguas subterráneas que se les consideraba libres de contaminación hoy soportan tanto la filtración de metales como diversos productos químicos utilizados en la agricultura, toxinas, etc.

Los pozos tienden a ser cada vez más profundos, de ésta forma se incrementan los costos de perforación y bombeo.

El nivel pizométrico del acuífero se abate cerca de un metro cada año, esto como consecuencia de la sobreexplotación, a su vez, esto origina el hundimiento del terreno, con un promedio anual de 9cm, aunque hay zonas de la ciudad en que llega a 40 cm. E incluso encontramos zonas donde se han presentado grietas, también como consecuencia del excesivo bombeo de agua subterránea.

La posibilidad de captar agua de otras fuentes resulta cuestionable por dos razones: Porque se sabe que dichas fuentes ya están siendo aprovechadas por su población local y por otra parte porque la inversión necesaria y los costos de mantenimiento y bombeo que implicarían operar una nueva infraestructura, harían prohibitivo el precio del agua para los consumidores.

Más del 60% del agua que se suministra a la población en la zona urbana de la Ciudad de México, proviene del subsuelo del Valle.

De todo esto surge la conveniencia de analizar la posibilidad de acondicionar cierto caudal de aguas residuales que se generan en el Valle de México, de tal forma que se permita la recarga artificial de acuíferos, con lo que se podría evitar la sobreexplotación de las aguas subterráneas, incrementar significativamente la dotación de agua potable y por otra parte evitar el continuo hundimiento de la ciudad además disminuir o evitar la importación de agua de otras fuentes.

La carencia de una cultura de rehúso del agua da como resultado que ni a nivel hogar, ni a nivel municipal, ni a nivel industrial se realice esta práctica, mediante la cual, disminuiría la extracción de agua del acuífero por medio de los pozos en operación incluyendo los de las industrias que en total consumen 110 millones de metros cúbicos anuales de agua, con una mínima cuantía, hasta ahora de agua de rehúso, no obstante que podría satisfacer hasta el 60% de su consumo con agua tratada.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Debido a la severa sobreexplotación que se hace a los mantos acuíferos del Valle de México, las autoridades del Gobierno del Distrito Federal, tienen la intención de aprovechar al máximo el agua potable con que se cuenta y destinar la misma a un menor número de usos dentro de lo posible, abasteciendo éstos con agua residual tratada que cumpla la normatividad vigente de acuerdo a su utilización final; así como también, la recarga del acuífero con éste tipo de agua. Esto impulsa a un mayor tratamiento e intercambio de las aguas utilizadas en la industria, destinando el agua potable solo para uso doméstico.

En el Capítulo I se realiza un estudio de balance geohidrológico el cual sirve como antecedente para conocer el estado actual del agua en el subsuelo, ya que el agua subterránea constituye una importante fuente de abastecimiento de agua potable para la ZMCM, además de que en este capítulo conoceremos la forma en la cual se subdivide el acuífero del valle de México, los volúmenes de extracción en pozos de la ZMCM, así como la forma en que ocurre el drenado vertical de arcillas, que en combinación con la sobreexplotación de acuíferos provoca hundimientos diferenciales.

En el Capítulo II se realiza la proyección de población en el Distrito Federal, así como en el área conurbada, con lo cual podemos saber que la elevada concentración humana en el Valle de México y el exceso consecuente de sus demandas, han provocado que el agua proveniente de los mantos acuíferos sea insuficiente. Por ello, desde hace años se ha tenido que recurrir a fuentes externas para satisfacer las necesidades de la población. Por otra parte se sabe que los problemas de calidad del agua y las limitaciones en su abastecimiento en la Zona Metropolitana del Valle de México se relacionan directamente con el crecimiento de la población.

El continuo crecimiento de su población, que demanda cada vez mas volúmenes de agua potable. Para su satisfacción, se ha obligado a sobreexplotar el acuífero.

El objetivo en México es el garantizar el abasto futuro de agua potable para la creciente población. La ciudad deberá obtener como mínimo 19 metros cúbicos por segundo adicionales, para abastecer la nueva población en los próximos 15 años.

El Tercer Capítulo, se enfoca en describir los principales objetivos que se persiguen con la recarga de acuíferos, así como la descripción de los dos grupos de sistemas de recarga y métodos aplicables en la ZMCM.



En el Capítulo IV se da una breve historia de los orígenes y necesidades por las cuales se capta y distribuye el agua residual, los diferentes orígenes de agua residual, la forma general en que son transportadas y como se distribuyen dentro de la ZMCM, además de los usos que se le dan en las distintas delegaciones políticas.

El Capítulo V se encarga de describir el acondicionamiento de aguas residuales para la recarga del acuífero, los principales componentes que causa alteraciones o deterioro en las aguas subterráneas, los estándares de calidad para recargar el acuífero así como la descripción de dos alternativas de tratamiento para obtener un efluente deseado que sea conveniente para la recarga directa.

El Capítulo VI trata de la recarga al acuífero, indicando cuales serían las zonas más apropiadas según sus características de cada zona, los métodos de recarga más convenientes y que pueden ser aplicables a la ciudad de México, las plantas de tratamiento que pueden ser utilizadas dependiendo su ubicación y para tener un efluente para recarga, además de los criterios que se utilizan para el diseño de pozos y estanques para recarga artificial.

A lo que se refiere el Capítulo VII, es un estudio tipo en donde se indican los principales puntos que se deben considerar para poder desarrollar un proyecto de recarga de acuíferos con agua residual tratada, en donde se mencionan además los procesos de tratamiento básicos para definir un tren de tratamiento adecuado para obtener un efluente deseado, dependiendo el tipo de uso que se le dará.

Finalmente el Capítulo VIII, es información obtenida de la revista "ingeniería Civil", se enfoca en mencionar los principales beneficios, riesgos, y catástrofes que se pueden presentar al recargar el acuífero con agua residual.



## ANTECEDENTES.

Alguna forma de recarga artificial de acuíferos se realizó en la antigüedad en zonas áridas, principalmente corrigiendo la pendiente del terreno ó represando causes de ríos. Así, podemos citar a los romanos que efectuaron aterrazamientos en laderas de los valles y represas en el norte de Africa, en especial en el actual Túnez. Desde hace siglos en los ríos Uadis y Saguias en Mauritania y en las áridas islas occidentales de las canarias en España se practica la recarga artificial por medio de represas, las cuales son conocidas con el nombre de gavias.

Desde el punto de vista moderno, la recarga artificial de acuíferos, prácticamente inicia a fines del siglo XIX, iniciándose las primeras obras en Suecia y en Alemania. El método de recarga en balsas y zanjas pronto se extendió por Europa Occidental y Central, donde la densidad de población es muy elevada y gran parte de los abastecimientos de agua para consumo humano son subterráneos.

En América, en el estado de California, Estados Unidos, se iniciaron los primeros trabajos de recarga por infiltración en zonas inundadas en 1896 y por fugas de canales en 1898, llegándose a recargar hasta 250 l/s en la ciudad de Fresno. En 1903 se inició la inyección profunda con pozos.

La recarga, continua intermitente u ocasional, se realiza en muchos países, prácticamente desde los mediados del presente siglo. Japón, Australia, Africa del sur, Irán, México son algunos ejemplos.

A mediados del siglo XIX, se empezaron a perforar los primeros pozos para el abastecimiento de agua de la ciudad de México, debido a sus mejores características de calidad respecto al agua superficial, y por que los manantiales existentes ya estaban siendo aprovechados, implicando que estos se incrementaran rápidamente.

En 1854 se habían perforado 24 pozos y para fines del siglo ya existían mas de 500 pozos y norias de poca profundidad, principalmente en casas particulares.

Durante los últimos años del siglo XIX, se construyó el acueducto que capta los manantiales de Xochimilco, los cuales con el tiempo se sustituyeron por pozos profundos, con la idea de aumentar el caudal de los mismos, siendo la causa del abatimiento del nivel freático y por consecuencia el agotamiento de estos cuerpos de agua.



El acelerado crecimiento de la ciudad en los años 30's originó que en 1942 se iniciaran la primera obra de importación de aguas al Valle de México, desde la cuenca del río Lerma.

Esta misma obra incrementó su caudal en los años 60's al captar mas número de pozos de reciente perforación.

En el periodo de 1936 a 1944 en la primera etapa del acueducto Lerma, se incrementó la explotación de aguas subterráneas en el valle de México, llegándose a perforar hasta 99 pozos en el área central de la ciudad, provocando un hundimiento diferencial que propició la dislocación de colectores de drenaje trayendo como consecuencia grandes inundaciones en la capital entre 1948 y 1952.

Sin embargo, el proceso de industrialización del país y la centralización que se ha tenido, dio lugar al explosivo crecimiento urbano, que derivó la perforación de nuevos pozos, así en 1957 comienza a operar el acueducto de Chiconautla y en 1958 el del Peñón.

Ante la demanda de agua que requerían sus procesos de producción, los propios industriales perforaron pozos para su autoabastecimiento, operando pozos en las zonas industriales de Vallejo, Naucalpan, Nezahualcoyotl, Ecatepec y Tlalnepantla.

En la actualidad la irracional sobreexplotación de los mantos acuíferos en la ciudad de México, y en otras ciudades de nuestro país, ha ocasionado hundimientos importantes, como sucede en el oriente del valle, específicamente en el llamado Valle de Chalco, que los hundimientos diferenciales oscilan entre los 40 cm al año. Estos hundimientos prácticamente se presentan en toda la ciudad de México variando en función de la extracción del agua del subsuelo y del espesor de la capa arcillosa.

Ante la problemática relacionada con los asentamientos diferenciales presentados en la ciudad de México, que algunos casos hace inoperante sus estructuras de conducción de aguas pluviales y residuales, en el Gobierno del Distrito Federal ha planteado la necesidad de realizar estudios de gran visión para recargar los acuíferos con agua residual tratada, la cual garantice su calidad para evitar la contaminación de los cuerpos de agua subterráneos.



## CAPITULO I.

### BALANCE GEHIDROLÓGICO DE LA ZMCM.

#### I.1 AREAS Y POZOS CONSIDERADOS

El abastecimiento de agua a la zona metropolitana de la Ciudad de México, se realiza capturando fuentes tanto de agua subterránea como superficial. Muchas de estas fuentes provienen de los alrededores de la Ciudad de México. El área incluida para este balance abarca alrededor de 2000 km<sup>2</sup>, extendiéndose hacia el este de la ZMCM hasta Chalco y Texcoco, y al norte hasta Chiconautla.



ZONA DE ESTUDIO DEL BALANCE GEHIDROLÓGICO

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Para realizar este balance, se recopiló información de diferentes fuentes, siendo la principal la DGCOH, además de la Comisión Estatal de aguas y Saneamiento del Estado de México, CNA, entre otras. De todas estas se recopiló la localización de pozos existentes.

Dentro de la Ciudad de México, se incluyen 677 pozos municipales y particulares. En el valle de Texcoco existen censados 406 pozos, utilizados principalmente en la agricultura.

Al norte, en Chiconautla, existen 47 pozos principalmente municipales utilizados en agua potable y al poniente, del caracol de Texcoco 64 pozos.

En la zona noroccidental se encuentran 10 pozos de agua potable.

En el área de Chalco existen 285 pozos que incluyen municipales (DDF y GAVM), particulares y fuentes de abastecimiento de los poblados que se ubican en dicha zona.



## 1.2 GASTOS Y VOLÚMENES DE EXTRACCIÓN

Se obtuvieron los gastos de extracción para cada uno de los pozos. En la mayor parte de ellos a partir de registros continuos.

Por lo anterior, se considera que las cifras obtenidas presentan buena exactitud.

Los gastos de extracción se presentan en las siguientes tablas:

**VOLUMENES DE EXTRACCIÓN POR POZO**  
**(DGOH) 1995**

No.	Volumen Mm3/año	No.	Volumen Mm3/año	No.	Volumen Mm3/año	No.	Volumen Mm3/año
1	0.462	90	1.567	140	0.724	TXN-2	2.236
3	0.774	91	1.22	141	2.202	TXN-3	1.651
11	0.884	92	1.107	142	0.893	TXS-1	1.575
12	1.01	93	0.96	143	0.322	TXS-2	1.997
14	0.929	96	0.887	145	0.695	TXS-3	1.605
15	0.454	97-B	1.551	161	1.503	VC-1	0.162
17	1.21	105	0.798	188	1.325	VCH-2	1.522
18	1.599	116	0.724	189	0.64	VCH-2	2.107
22	1.661	119	0.399	229	1.181	VCH-3	1.74
26	0.787	121	0.212	230	1.288	VCH-4	1.813
30	0.354	127	0.265	231	1.955	VO-10	2.359
33	0.815	132	0.448	232	0.635	VO-11	2.344
37	1.288	136	0.714	233	1.708	VO-12	0.089
46	0.905	153	0.889	234	0.905	VO-13	2.333
56	0.656	158	0.475	235	0.989	VO-14	2.27
57	1.157	166	0.404	236	0.942	VO-2	1.753
58	0.884	192	1.433	237	1.603	VO-3	1.916
63	0.929	193	1.69	238	0.485	VO-4	1.748
64	0.275	196	0.908	239	1.215	VO-5	2.115
65	0.257	198	1.454	240	1.16	VO-6	1.69
66	0.338	199	1.029	241	1.097	VO-7	0.517
68	0.674	261	1.21	242	0.968	VO-8	2.142
71	1.475	262	0.425	332	0.002	VO-9	2.021
72	0.979	263	1.323	CH-1	2.22	5	0.774
73	1.207	318	1.134	CH-3	2.01	6	2.123

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



VOLUMENES DE EXTRACCIÓN POR 2070  
(DGCCH) 2005

No.	Volumen Mm3/año	No.	Volumen Mm3/año	No.	Volumen Mm3/año	No.	Volumen Mm3/año
76	1.507	PS-22	0.742	CH-5	1.853	7	1.703
77	0.808	PS-27-B	1.005	GC-1	1.939	27	0.585
83	1.349	39	0.782	SCE-1	1.519	28	0.777
84	0.924	100	0.929	SCE-3	1.249	38	1.102
85	0.042	102	1.38	SCE-4	1.706	41	0.727
86	0.895	137	0.404	TXN-1	2.136	42	0.231
45	0.393	170	1.315	4-A	0.876	248	1.094
50	1.635	190	1.141	4-B	0.015	254	2.199
53	1.139	203	1.278	4-C	0.889	255	1.559
59	1.708	204	1.12	6-A	0.341	256	0.391
60	0.561	246	0.593	6-B	0.535	259	1.375
61	2.136	323	1.267	6-C	0.924	265	0.753
82	1.071	324	1.246	7-A	1.806	266	1.302
103	1.593	SC-10	0.569	9-B	0.467	267	0.745
104	1.236	SC-11	1.932	10-C	1.485	268	0.889
107	2.824	SC-7	1.023	11-A	1.559	270	1.54
108	1.33	SC-9	0.842	11-B	1.871	272	1.365
109	2.399	29	0.399	10	0.556	305	3.228
110	2.118	35	0.8	19	0.96	306	2.443
111	1.338	80	0.627	40	0.648	307	3.147
112	1.635	88	0.504	44	0.771	308	2.457
113	1.887	120	0.238	47	1.204	309	2.191
114	1.294	154	0.422	48	0.784	310	1.701
115	1.459	155	0.787	74	1.254	311	2.233
124	1.483	157	0.32	94	2.275	313	1.682
125	1.677	175	0.766	95	2.31	314	1.488
126	0.811	180	0.12	117	2.317	315	0.913
126-A	1.47	182	0.27	122	2.52	316	0.658
128	0.408	253	0.233	129	1.533	322	1.354
139	1.071	269	0.546	130	1.034	PER-1	1.971
144	0.241	1-A	0.837	165	1.055	PER-10	0.84
150	1.05	1-B	2.391	171	0.903	PER-11	1.204
151	0.737	1-C	1.438	176	1.441	PER-12	1.522
162	0.88	2-A	1546	194	0.805	PER-13	1.638
163	1.722	2-B	0.509	197	1.155	PER-14	0.808
167	0.693	2-C	0.918	217	1.546	PER-16	1.451
168	1.813	3-C	1.212	226	1.005	PER-19	1.401

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**VOLUMENES DE EXTRACCIÓN POR POZO  
 (DICOH) 1996**

No.	Volumen Mm <sup>3</sup> /año	No.	Volumen Mm <sup>3</sup> /año	No.	Volumen Mm <sup>3</sup> /año	No.	Volumen Mm <sup>3</sup> /año
PER-3	2.005	TEC-11	2.155	282	0.422	R-6	0.69
PER-5	1.577	TEC-12	2.333	283	0.643	R-7	0.288
PER-6	0.454	TEC-13	2.415	284	0.294	R-8	0.708
PER-7	0.63	TEC-14	1.561	286	1.181	R-9	0.54
PER-8	1.357	TEC-15	1.824	287	0.593	97	0.454
PER-9	1.884	TEC-17	1.273	288	0.679	209	1.078
PS-17	0.651	TUL-2	1.336	289	0.669	210	0.855
PS-18	0.498	TUL-3	1.569	290	0.304	211	0.994
PS-20-B	2.43	TUL-4	1.186	291	0.173	212	0.732
PS-21	1.866	TUL-5	1.338	292	1.147	213	1.69
PS-24-B	1.349	TUL-6	0.238	293	0.832	216	1.428
PS-25	1.01	TUL-7	1.874	294	1	219	0.9
PS-31	1.955	TUL-8	1.753	295	0.693	220	0.63
PS-32	3.184	TUL-9	1.727	296	0.863	221	1.451
206	0.929	31	0.456	297	0.829	222	0.808
207	1.53	49	1.365	298	0.48	228	1.025
208	1.884	54	0.729	299	0.819	249	2.501
252	1.554	62	0.966	300	1.821	271	1.98
276	1.842	133	1.428	301	1.008	273	1.365
R-11	1.698	134	1.052	317	0.934	274	1.417
R-18	1.309	148	0.168	319	0.546	275	2.47
R-19	0.766	159	0.693	320	0.958	277	1.622
R-21	1.27	172	0.874	328	0.485	278	1.674
R-22	1.309	173	0.422	329	0.236	279	2.042
R-24	0.469	191	0.385	331	0.123	302	1.716
R-25	1.771	218	1.456	PS-37	1.178	303	0.244
R-26	0.75	223	0.59	R-1	0.364	304	0.556
R-28	1.257	225	0.283	R-10	0.834	N-1	1.05
S-12	1.771	250	0.433	R-2	1.031	N-2	1.328
S-13	0.53	251	0.666	R-3	0.501	N-3	1.107

La extracción total en el área de estudio es de 864.66 Mm<sup>3</sup>/año que equivale a un caudal instantáneo de 27.42 m<sup>3</sup>/seg.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



Para realizar el balance geohidrológico se dividió el área de estudio en 3 subsistemas acuíferos denominados:

1. Ciudad de México
2. Texcoco
3. Chalco

La extracción total de agua subterránea en cada uno de los subsistemas acuíferos mencionados fue de 390.75, 286.54 y 187.37 Mm<sup>3</sup>/año respectivamente, lo que equivale a 12.39, 9.09 y 5.94 m<sup>3</sup>/seg.

Por otra parte se hace notar que el área de balance de aguas subterráneas se concentra hacia la zona del valle, delimitadas por las curvas de la configuración pizométrica. Las áreas que se encuentran fuera de la zona de balance, incluye extracción, la que se resta de la total, para obtener la extracción dentro del área de balance.

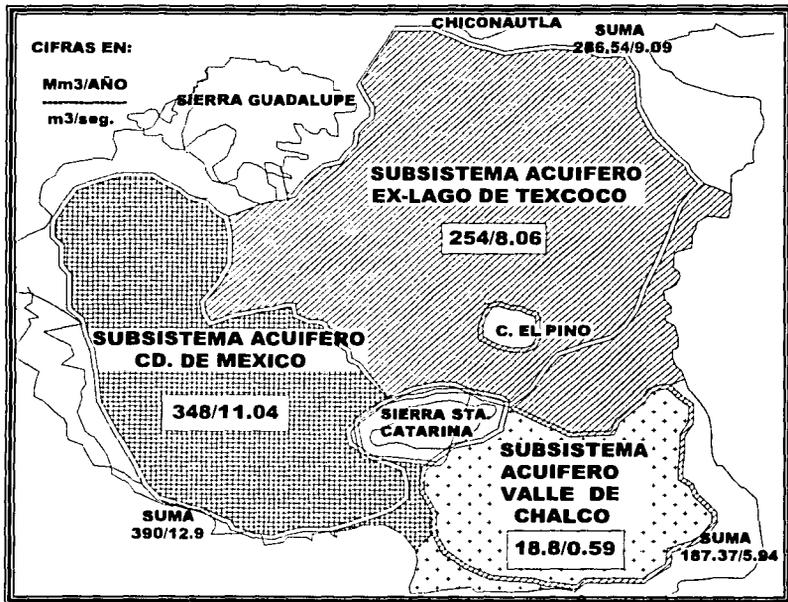
En la siguiente tabla se muestran los caudales de extracción tomando en cuenta las diferentes áreas mencionadas.

SUBSISTEMA ACUIFERO		VOLUMEN Mm <sup>3</sup> /año	CAUDAL m <sup>3</sup> /seg.
Ciudad De México	Fuera de área de balance; pozos al SW, y pozos SL	42.75	1.35
	Dentro del área de balance	348.00	11.04
	<b>SUMA</b>	<b>390.75</b>	<b>12.93</b>
Texcoco	Fuera de área de balance; Ote. de la Sierra de Guadalupe y NE de Texcoco.	32.54	1.03
	Dentro del área de balance	254.00	8.06
	<b>SUMA</b>	<b>286.54</b>	<b>9.09</b>
Chalco	Fuera de área de balance; pozos Tecomitl; Zona Chalco oriente.	18.80	0.59
	Dentro del área de balance	168.57	5.35
	<b>SUMA</b>	<b>187.37</b>	<b>5.94</b>
<b>TOTAL</b>		<b>864.66</b>	<b>27.4</b>

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Se hace notar también, que la extracción para el área de balance de la Ciudad de México fue de 348 Mm<sup>3</sup>/año, que equivale a 11.04 m<sup>3</sup>/seg; en Texcoco, la extracción fue de 254 Mm<sup>3</sup>/año equivalente a 8.06 m<sup>3</sup>/seg; y a lo que se refiere a Chalco la extracción es de 168.57 Mm<sup>3</sup>/año equivalente a 5.35 m<sup>3</sup>/seg.



**VOLUMENES DE EXTRACCION POR SUBSISTEMA ACUIFERO**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



La evolución o cambio de almacenamiento registrado en el acuífero para 1993-1995, fue medida y calculada por la DGCOH, de donde se obtuvieron los siguientes resultados:

SUBSISTEMA ACUÍFERO	CAMBIO DE ALMACENAMIENTO	
	Mm <sup>3</sup> /año	m <sup>3</sup> /seg.
CIUDAD DE MÉXICO	-12.82	-0.41
TEXCOCO	-23.00	-0.73
CHALCO	-6.47	-0.21

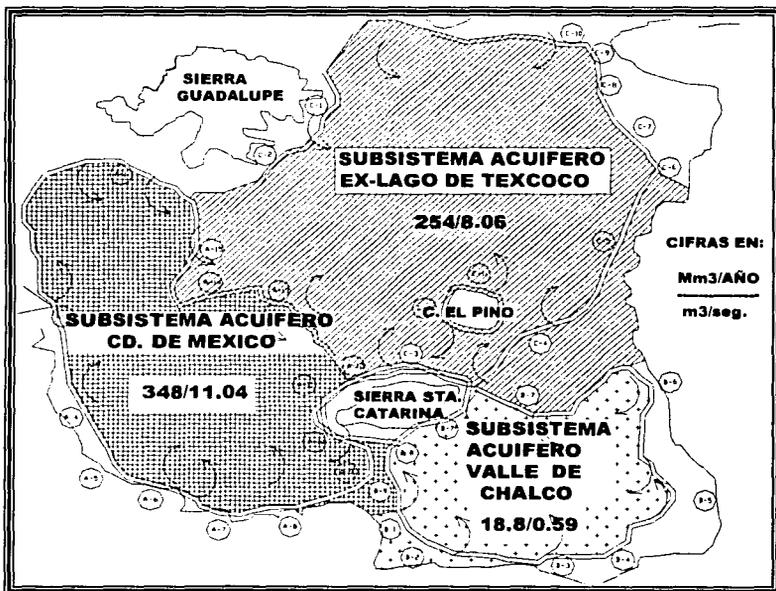
Las modificaciones que ha venido sufriendo el acuífero permiten simular su comportamiento futuro, aunque puede presentar variaciones de un año a otro de acuerdo a las políticas de extracción y modificaciones en la recarga que se generen a futuro.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### 1.3 RECARGA POR FLUJO SUBTERRANEO.

Se realizó la cuantificación del flujo subterráneo a partir de la red pizométrica, utilizando celdas para el calculo de las entradas por flujo hacia los diferentes subsistemas acuiferos, de esta manera, se tuvo que la entrada por flujo subterráneo en la Ciudad de México ascendió a 257 Mm<sup>3</sup>/año, equivalente a 8.15 m<sup>3</sup>/seg. ; en el área de Texcoco fue de 154.3 Mm<sup>3</sup>/año, equivalente a 4.89m<sup>3</sup>/seg; y en Chalco ascendió a 135.7 Mm<sup>3</sup>/año, equivalente a 4.30 m<sup>3</sup>/seg.



RED PIZOMETRICA DEL SISTEMA ACUIFERO

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



#### ***1.4 RECARGA POR DRENADO VERTICAL***

El acuífero de la ZMCM se encuentra cubierto por una capa de arcillas lacustres. Éstas, se encuentran parcialmente saturadas y funcionan como una unidad que permite la entrada de agua, pero por su baja permeabilidad la salida del agua es muy limitada, ya que en su mayor parte se encuentra absorbida en las arcillas por retención molecular, a este fenómeno se le llama Acuitardo.

Antiguamente las arcillas confinaban al acuífero. En varias partes de la ZMCM, la extracción por bombeo y su consecuente abatimiento de cargas Pizométricas, han modificado el tipo de acuífero, de confinado/semiconfinado a libre. Dadas las características y posición del acuitardo sobre el acuífero, se genera el paso del agua de la capa arcillosa hacia el acuífero, lo cual corresponde a una recarga y se le denominó Drenado Vertical.

En los flancos de las elevaciones topográficas y donde los materiales no se encuentran cubiertos por arcillas lacustres, existe otro tipo de recarga por infiltración vertical procedente de la lluvia.

Dentro del valle (donde se encuentran las arcillas), la infiltración de agua de lluvia o de fugas de redes de distribución, podría llegar a recargar el acuitardo. Sin embargo, los volúmenes susceptibles de ello son sumamente reducidos, debido a baja permeabilidad de las arcillas, por lo que su cuantificación se considera despreciable.

Por otra parte, existen grietas de desecación en las arcillas que se han observado en varias partes del valle, a través de las cuales se llega a infiltrar agua de diferentes orígenes al subsuelo, desconociéndose su magnitud y su destino final.

La infiltración de aguas pluviales en los flancos de elevaciones topográficas y en especial en aquellas constituidas por materiales de alta permeabilidad, al infiltrarse a través de éstas rocas, el agua circula para entrar al sistema acuífero en forma de flujo subterráneo.

Por lo anterior, la actual recarga al acuífero corresponde principalmente al drenado de las arcillas.

A principios del siglo, cuando el acuífero y el acuitardo de la Ciudad de México se encontraban vírgenes, las recargas por infiltración lateral que recibía el acuífero ocasionaba que se encontrara saturado. Las arcillas lacustres confinaban al acuífero y se encontraban también saturadas, y con un nivel cercano o arriba de la superficie, provocando lagunas que representaban el nivel freático o pizométrico.



Posteriormente y debido a la extracción de las aguas subterráneas que se empezó a realizar, se provocó una reducción en la presión o carga pizométrica dentro del acuífero, lo que provocó un movimiento vertical descendente del agua de las arcillas hacia el acuífero.

Cuando el nivel freático en las arcillas era menor que la carga hidráulica o presión pizométrica del acuífero, este último no recibía aportes por drenado vertical. Este fenómeno, se empieza a generar en el momento en el que la recarga pizométrica del acuífero se reduce, por la explotación por bombeo y empieza a ser menor que la carga hidráulica de las arcillas (nivel freático)

### ***1.5 METODOLOGIAS PARA CALCULO DE LA RECARGA POR DRENADO.***

Debido a las especiales características del acuífero de la ZMCM, el cálculo de la recarga por drenado que actualmente se genera (del acuitardo que drena hacia el acuífero) es complejo, debido a que intervienen varios factores, entre ellos, las diferencias en cargas Pizométricas entre el acuitardo y el acuífero, el espesor de arcillas, el grado de bombeo del acuífero, etc. Debido a ello, éste valor se incluye como incógnita en la ecuación de balance geohidrológico del punto I.6

A manera de ensayo, se presentan dos métodos "gruesos", cuyo objetivo es el de deducir ordenes de magnitud del drenado vertical.

#### ***1- CAMBIO DE VOLÚMEN EN EL ACUITARDO (hundimiento)***

En la zona Metropolitana de la Ciudad de México, el área utilizada para el balance tiene una superficie de 400 kilómetros cuadrados, de los cuales 260 corresponden al valle cubierto por las arcillas lacustres y 140 kilómetros cuadrados a las estribaciones de las sierras, incluyendo el área de los pedregales (basaltos) del suroriente de la ciudad.

Utilizando números "gruesos" para el calculo del volumen drenado en los 260 kilómetros cuadrados del valle, donde se encuentran arcillas lacustres, se tiene que: El hundimiento medio anual para los últimos años fue de 10.5 centímetros. Al multiplicar 260 kilómetros cuadrados por la lámina de 10.5 centímetros, se obtiene un volumen de hundimiento de 27.3 Mm<sup>3</sup>/año. Por otra parte los 140 km<sup>2</sup> restantes se tiene que: La precipitación media anual es de 800 milímetros, los cuales multiplicados por el área y por un coeficiente de infiltración de 0.15, resulta un volumen infiltrado al subsuelo de 16.8 Mm<sup>3</sup>/año.

Al sumar los dos volúmenes anteriores de 27.3 y 16.8, se obtiene un volumen de recarga que asciende a 44.1 Mm<sup>3</sup>/año.



## 2- CALCULO DEL CAUDAL DE AGUA CEDIDA POR LAS ARCILLAS.

Este otro ensayo es para conocer el orden de magnitud del volumen aproximado de recarga. Se utiliza la fórmula de infiltración vertical:

$$Q = KAi$$

Donde:

Q = caudal de infiltración [Mm<sup>3</sup>/año]  
K = permeabilidad del terreno [m/seg.]  
A = área de la zona de estudio [Km<sup>2</sup>]  
i = gradiente hidráulico.

Se considero una permeabilidad media para las arcillas de todo el Valle de México, de  $4 \times 10^{-9}$  m/seg. ; el área con arcillas considerada, fue de 260 kilómetros cuadrados; el gradiente hidráulico, por ser una infiltración vertical, se considero unitario.

Aplicando los valores a la ecuación, elevados al año, se obtiene un volumen de 32.8 Mm<sup>3</sup>/año, los que sumados a la infiltración pluvial en los 140 Km<sup>2</sup> restantes, da una recarga total de 49.6 Mm<sup>3</sup>/año. Se recuerda que este valor "grueso" tuvo por conocer el orden de magnitud de la recarga con diferentes métodos de cálculo.



## 1.6 ECUACION DE BALANCE VOLUMETRICO

La ecuación de balance establece que:

$$E = S + As$$

Donde:

E = Entradas de agua al acuífero [Mm<sup>3</sup>]

S = Salidas de agua del acuífero [Mm<sup>3</sup>]

As = Cambio de almacenamiento del acuífero. [Mm<sup>3</sup>]

Las entradas de agua al acuífero son:

Es = Entrada por flujo subterráneo [Mm<sup>3</sup>]

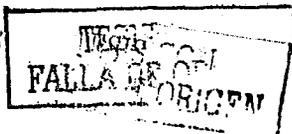
Dv = Drenado Vertical [Mm<sup>3</sup>]

La salida de agua del acuífero es:

Ext. = Extracción por bombeo [Mm<sup>3</sup>]

Por lo tanto:

$$Es + Dv = Ext + As \dots\dots\dots (1)$$





## 1.7 DRENADO DE LAS ARCILLAS

Tomando como base la anterior ecuación (1), se despejó el drenado vertical obteniéndose que:

$$D_v = \text{Ext} - E_s + A_s$$

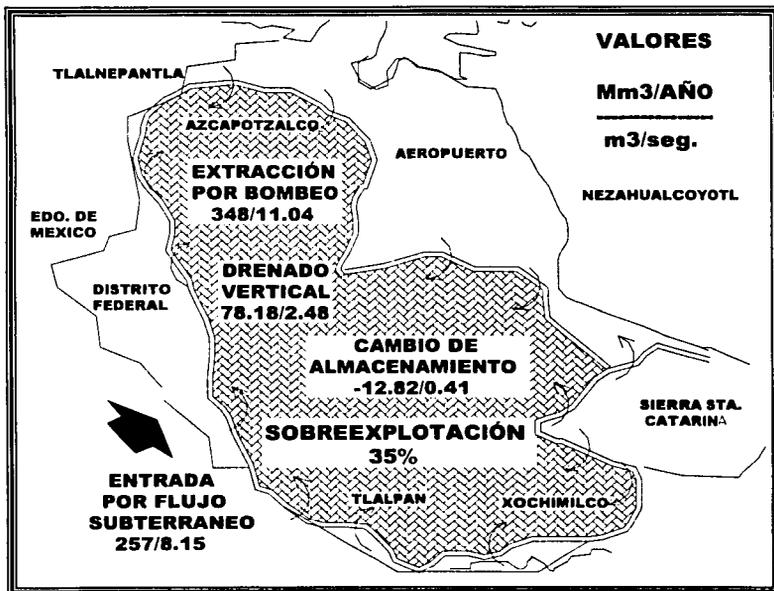
Utilizando los datos de entrada por flujo subterráneo, extracción y cambio de almacenamiento, se dedujo la recarga por drenado en cada subsistema acuífero, lo cual resultó; para la Ciudad de México, de  $78.18 \text{ Mm}^3/\text{año}$  equivalente a  $2.48 \text{ m}^3/\text{seg}$ ; para Texcoco fue de  $76.7 \text{ Mm}^3/\text{año}$  que equivale a  $2.43 \text{ m}^3/\text{seg}$ ; mientras que, en el valle de Chalco, la infiltración resultó de  $26.4 \text{ Mm}^3/\text{año}$  equivalente a  $0.84 \text{ m}^3/\text{seg}$ .



## 1.8 SUBSISTEMA ACUÍFERO CIUDAD DE MÉXICO

En la siguiente figura se incluyen los resultados del balance geohidrológico en el área correspondiente al subsistema acuífero de la Ciudad de México. Las entradas de agua al acuífero corresponden, por una parte, al flujo subterráneo que ascendió a  $257 \text{ Mm}^3/\text{año}$  y por otra al drenado vertical que fue de  $78.18 \text{ Mm}^3/\text{año}$ . La salida fue de 348 y el cambio de almacenamiento de  $-12.82 \text{ Mm}^3/\text{año}$ .

Si se considera que la sobreexplotación del acuífero corresponde al cambio de almacenamiento y al drenado de las arcillas, obtenemos un volumen de  $91.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$ . Este volumen dividido entre la recarga por flujo subterráneo, da un porcentaje de sobreexplotación del 35%.



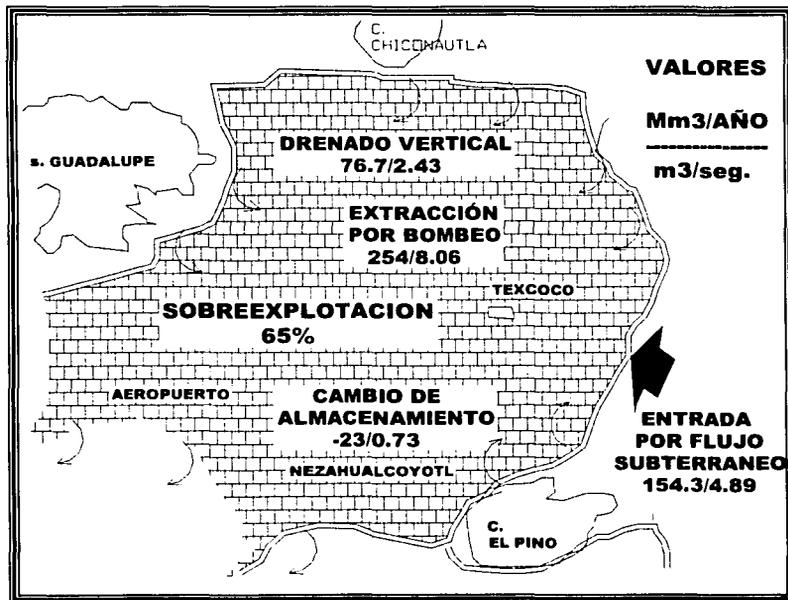
BALANCE GEOHIDROLÓGICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO



### 1.9 VALLE DE TEXCOCO

Hablando de otro de los subsistemas del acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México es el del Valle de Texcoco, se observó que existió una recarga o entrada de flujo subterráneo de  $154.3 \text{ Mm}^3/\text{año}$ , una extracción de  $254$  y aporte por drenado de las arcillas de  $76.7 \text{ Mm}^3/\text{año}$ , lo que originó un cambio de almacenamiento de  $-23.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$ . De aquí se deduce una sobreexplotación del acuífero del 65%.

A continuación se presenta en la figura, el balance geohidrológico del valle de Texcoco.



**BALANCE GEOHIDROLOGICO DEL VALLE DE TEXCOCO**

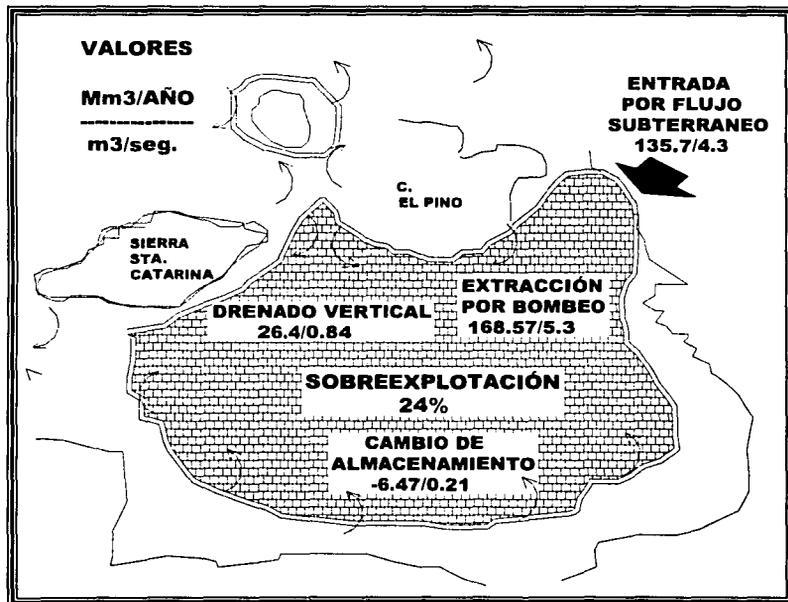
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### 1.10 VALLE DE CHALCO

Por lo que respecta al Valle de Chalco, la recarga por flujo subterráneo fue de 135.7 Mm<sup>3</sup>/año, el aporte por drenado de las arcillas de 26.4 y la extracción por bombeo de 168.57 Mm<sup>3</sup>/año, lo que ocasionó un cambio de almacenamiento de -6.47 Mm<sup>3</sup>/año. Estos valores indican una sobreexplotación del acuífero del 24%.

En las siguientes figuras se muestran los valores para el balance geohidrológico del Valle de Chalco.



BALANCE GEOHIDROLOGICO DEL VALLE DE CHALCO

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## **CAPITULO II.**

### **PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN DEL D.F. Y 27 MUNICIPIOS CONURBADOS.**

#### **II.1 GENERALIDADES**

La superpoblación y las actividades urbano - industriales, ocasionan la acumulación de desechos sólidos de diferentes tipos, emisiones de humos y gases a la atmósfera, pérdida de especies animales y vegetales, y contaminación del agua.

Por tal razón y con el fin de conocer los requerimientos tecnológicos en materia ambiental, que se manifiestan, es necesario realizar las acciones necesarias para revertir toda la problemática que surge del deterioro ambiental.

Entre dichas acciones se encuentran el análisis de estas tendencias y de la situación ambiental de la ZMCM, incorporado a un adecuado análisis de los diversos aspectos que repercuten en la calidad del medio ambiente. Tales aspectos son: el comportamiento futuro de la población, el uso del suelo, la demanda y uso de los recursos naturales, la concentración de contaminantes en el aire, agua y suelo, entre otros.

Los hogares de bajos ingresos representan una preocupación particular, dado que por lo general no tienen un acceso al agua que les permita cubrir en forma adecuada sus necesidades de salud e higiene. La Organización Mundial de la Salud ha establecido un mínimo de 150 litros diarios por hogar en ciudades de los países desarrollados; para combatir las enfermedades relacionadas con el agua, se consideran necesarios 75 litros al día (Falkenmark y Suprpto, 1992) El Banco Mundial calcula que se requieren por lo menos 50 litros per cápita al día para evitar problemas de salud. La causa principal de mortandad infantil en áreas rurales y en asentamientos irregulares son todavía las enfermedades diarreicas.

De aquí se toman importantes decisiones respecto a las alternativas que permitan garantizar el suministro de agua al Valle de México.

Respecto al consumo actual por habitante se tiene un buen grado de certidumbre, pero no así para la población futura.

La proyección de la población de la ZMCM al año 2010 que se realiza a continuación se lleva a cabo a través de dos métodos, Matriz de Leslie y Método de Interés Compuesto.



## II.2 LA MATRIZ DE LESLIE

El Método de La Matriz de Leslie, se ha usado con éxito para predecir el crecimiento de algunas especies del reino animal, similares a la humana, la aplicación de éste método es útil, dado que, a diferencia de las proyecciones típicas con base en tasas hipotéticas de crecimiento de la población, se toman en cuenta un conjunto de factores que hacen más confiable la proyección.

El método de Leslie permite predecir el número de habitantes en periodos de  $\Delta t$  años, a partir de la proyección de la población femenina del núcleo poblacional.

Los factores que se consideran para la proyección son:

- Se parte de la hipótesis de que las mujeres corresponden al 50% de la población total.
- La población femenina se agrupa en categorías, según edad, en intervalos de  $\Delta t$  años.
- La base de datos está integrada por las mujeres y el número de hijas que sobreviven, para cada categoría, reportadas en los periodos de  $\Delta t$  años previos al horizonte de proyección.
- Se incorpora el fenómeno de la migración, para establecer:

a) El patrón de evolución de la población femenina que cuantifica el porcentaje de mujeres que sobrevive y pasa a formar parte de la siguiente categoría de edades, al cabo de  $\Delta t$  años, incorporando la aportación por migración  $[P_1(I)]$ .

b) La aportación o disminución de las hijas de las mujeres inmigrantes o emigrantes, según la migración neta sea positiva o negativa.

c) La tasa de natalidad, para cada categoría, resultante del crecimiento natural de la población ya de la asociada a la migración neta ocurrida entre los dos periodos de  $\Delta t$  años, previos, que conduce a la cuantificación del promedio de hijas con edades en la primera categoría  $[H_1(I)]$

- La calibración del programa con los datos censales del periodo a partir del cual se define el horizonte de proyección conduce a la mejor evaluación de los coeficientes de la matriz de Leslie que reproducen la distribución de la población femenina para cada intervalo de edades.

Los parámetros más importantes son:

\* El periodo de evaluación de  $\Delta t$  años; entre más pequeño sea, mayor es la precisión.

\* Los coeficientes  $P_1(I)$  y  $H_1(I)$  cuya evaluación correcta es reflejo de la confiabilidad de la información disponible.

(VER PROGRAMA DE MATRIZ DE LESLIE EN ANEXOS)



## II.2.1 APLICACIÓN AL CASO DEL DISTRITO FEDERAL

Para la proyección de la población del D.F. se cuenta con la base de datos de la información de los censos de 1980 y 1990, y los datos del censo de 2000 se emplearon para la calibración del método.

Los datos de dicho censo confirman que el método de Leslie es aplicable, ya que, la proporción de la población femenina, respecto al total es del orden del 52%.

Cabe mencionar que las mujeres migran en mayor proporción que los hombres, en 2000 la relación de inmigración de mujeres fue del 78%. Por ello el método de Leslie estima la proyección en base a la población femenina.

### INFORMACIÓN BÁSICA PARA LA PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN DEL D.F.

CATEGORÍAS (años)	1970*		1980*		1990*	
	Mujeres	Hijas	Mujeres	Hijas	Mujeres	Hijas
0-9	992457	0	1109696	0	823832	0
10-19	836070	35603	1066274	33509	922851	23900
20-29	630922	507624	918556	524471	873394	409417
30-39	405527	856546	558612	828657	637754	733970
40-49	291744	757699	372799	798908	401900	683727
50-59	182600	521141	270383	569904	274246	587562
60 y más	215807	403521	298161	474326	346363	651024
No especif.	-		1996		15493	
Total d Mujeres	3555127		4596477		4295833	
POBLACION TOTAL	6874165		8831079		8235744	

\*INEGI

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



**PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN DEL D.F.  
METODO MATRIZ DE LESLIE**

CATEGORIAS	CENSO 2000*	PROYECCIÓN	
		2000	2010
0-9	836273	864416	811835
10-19	936787	699455	711363
20-29	886584	771477	590895
30-39	511265	599680	588076
40-49	407969	409801	401871
50-59	278388	263438	282805
60 y más	351594	341031	349207
Total Mujeres	4208860	3937693	3651635
POBLACIÓN TOTAL	8591309	7875386	7303269

\*INEGI

En esta tabla se observan los resultados de la proyección hasta el año 2010. Dichos resultados son satisfactorios, ya que las proyecciones para el año y 2010 se calcularon bajo la hipótesis de que el fenómeno de la migración, continúa en la misma proporción observada en la última década.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## **II.2.2 APLICACIÓN A LOS 27 MUNICIPIOS CONURBADOS AL D.F.**

Se contó con la siguiente información:

Datos de la población de 1980 y 1990 para cada municipio (INEGI), que fue integrada a la base de datos para la proyección.

Se encontró información en forma global de la población total emigrante de los 27 municipios conurbados (INEGI)

Población inmigrante en 1990 para cada municipio.

Y finalmente se estimó el porcentaje de migración a partir de los datos antes mencionados, ya que, las fuentes consultadas sólo reportan la migración total a nivel estatal.



**MIGRACION EN 1990 E INFORMACIÓN DE CENSOS DE POBLACION**

MUNICIPIO	% DE MIGRACIÓN	POBLACIÓN INMIGRANTE	CENSOS DE POBLACIÓN		
			1970*	1980*	1990*
Acolman	2.5	1728	20964	32316	43276
Atenco	1.2	418	10616	16418	21219
Atizapan	6.9	34756	44322	202248	315192
Coacalco	10.5	25757	13197	97353	152082
Cuautitlan I.	9.6	50611	-	173754	326750
Cuautitlan	6.5	5071	41156	39527	48858
Chalco	10.1	45891	41450	78393	282940
Chicoloapan	6.4	5868	8750	27354	57306
Chimalhuacan	5.2	20225	19946	61816	242317
Ecatepec	9.4	183320	216408	784507	1218135
Huixquilucan	6.2	13050	33527	78149	131926
Ixtapaluca	7.2	15924	36722	77862	137357
Jaltenco	8.5	3127	4738	7847	22803
Melchor O.	2.4	1023	10834	17990	26154
Naucalpan	5.1	65216	382184	730170	756551
Nezahualcoyotl	4.9	98259	580436	1341230	1256115
Nextlalpan	3.9	676	4360	7380	10840
Nicolás Romero	3.0	8816	47504	112645	184134
Paz La	4.6	9980	32258	99436	134782
Tecamac	5.7	11270	20882	84129	123218
Teoloyucan	2.0	1381	15477	28836	41964
Tepozotlan	3.4	2175	21902	27099	39647
Texcoco	4.0	9067	65628	105851	140368
Tlalnepantla	5.2	58494	366935	778173	702807
Tultepec	6.7	5060	11480	22910	47323
Tultitlán	9.2	36473	52317	136829	246464
Zumpango	2.6	2930	36105	51393	71413

INEGI\*

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

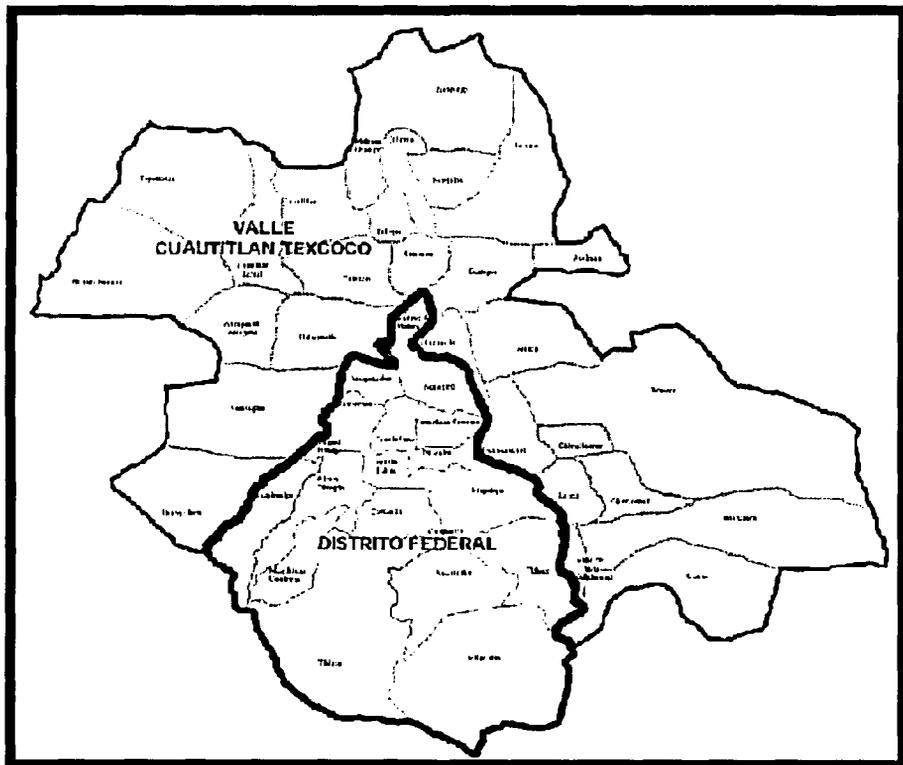


**PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN  
 DE LOS 27 MUNICIPIOS CONURBADOS AL DISTRITO FEDERAL  
 MATRIZ DE LESLIE**

MUNICIPIO	PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN		
	2000*	2000	2010
Acolman	61250	57037	74042
Atenco	34435	26236	33100
Atizapan	467886	467048	689458
Coacalco	252555	232488	380092
Cuautitlan I.	452976	646343	1265669
Cuautitlan	75836	62877	79506
Chalco	217972	1107756	4400465
Chicoloapan	77579	130328	297883
Chimalhucan	490772	1000755	4180248
Ecatepec	1622697	1784744	2786587
Huixquilucan	193468	232370	396510
Ixtapaluca	297570	257959	485295
Jaltenco	31629	68276	211424
Melchor O.	37716	39878	60732
Naucalpan	858717	791707	780877
Nezahualcoyotl	1225972	1099797	951171
Nextlalpan	19532	16897	26394
Nicolás Romero	269546	289642	461476
Paz La	212694	204199	297492
Tecamac	172813	172480	244983
Teoloyucan	66556	62512	93579
Tepozotlan	62280	61140	93614
Texcoco	204102	172085	217234
Tlalnepantla	721415	591732	488988
Tultepec	93177	104954	231271
Tultitlán	432141	470703	88848
Zumpango	99774	103316	149405
<b>27 Municipios</b>	<b>8753060</b>	<b>10255259</b>	<b>20265976</b>

INEGI\*

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



**ÁREA DE ESTUDIO PARA LA PROYECCIÓN DE POBLACIÓN AL AÑO 2010  
DISTRITO FEDERAL Y 27 MUNICIPIOS CONURBADOS**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### II.3 MÉTODO INTERÉS COMPUESTO:

Este método supone que el crecimiento de la población ocurrirá en forma exponencial, por lo cual, la proyección se realiza aplicando la fórmula:

$$P_t = P_0 (1 + i)^t \dots\dots\dots \text{ec. (1)}$$

Donde:

$P_t$  = Población final del periodo  $t$ .

$P_0$  = Población inicial.

$i$  = tasa de crecimiento.

Para aplicar el método primero deben calcularse la tasa de variación de crecimiento de los últimos periodos intercensales basándose en los dos últimos censos de población.

$$i = [(N_x/N_0)^{1/t} - 1] * 100$$

Donde:

$i$  = tasa media anual de variación de la población

$N_0$  = Población en el año 0

$N_x$  = Población de la localidad en el año  $x$

$t$  = Tiempo transcurrido en el periodo  $(x-0)$

Con esta tasa de crecimiento se procede a aplicar la ecuación 1 para calcular la población futura.



**EJEMPLO:**

Para el caso del Distrito Federal, se tienen los censos de 1980 y 1990, aplicando la ecuación de tasa de crecimiento:

$$i = [(N_x/N_0)^{1/n} - 1] * 100$$

entonces:

$$i = [(8235744 / 8831079)^{1/10} - 1] * 100 = 2.53 \% = 0.0253$$

así con la ecuación  $P_t = P_0 (1 + i)^t$  se tiene:

$$P_t = 8591309 (1 + 0.0253)^{10} = 11029832 \text{ hab.}$$

De esta forma se ha obtenido la proyección de la población al año 2000

**II.3.1 APLICACIÓN AL CASO DEL DISTRITO FEDERAL  
 ( METODO INTERES COMPUESTO)**

**PROYECCIÓN DE POBLACION DEL DISTRITO FEDERAL AL AÑO 2010  
 METODO INTERES COMPUESTO**

Censo de Población			Proyección de la población	
1980	1990	2000	2000	2010
8831079	8235744	8591309	11029832	8959040

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



**II.3.2 APLICACIÓN A LOS 27 MUNICIPIOS CONURBADOS AL D.F. (METODO INTERES COMPUESTO)**

**CENSOS DE POBLACION 1990 Y 2000  
 DE LOS 27 MUNICIPIOS CONURBADOS AL DISTRITO FEDERAL**

MUNICIPIO	CENSOS DE POBLACIÓN		TASA DE CRECIMIENTO
	1990	2000	1990-2000
Acolman	43276	61250	3.6
Atenco	21219	34435	5.0
Atizapan	315192	467886	4.1
Coacalco	152082	252555	5.2
Cuautitlan I.	326750	452956	3.3
Cuautitlan	48858	75836	4.5
Chalco	282940	217972	-2.6
Chicoloapan	57306	77579	3.1
Chimalhucan	242317	490772	7.4
Ecatepec	1218135	1622697	2.9
Huixquilucan	131926	193468	3.9
Ixtapaluca	137357	297570	8.1
Jaltenco	22803	31629	3.4
Melchor O.	26154	37716	3.8
Naucalpan	756551	858717	0.9
Nezahualcoyotl	1256115	1225972	-0.2
Nextlalpan	10840	19532	6.1
Nicolás Romero	184134	269546	3.9
Paz La	134782	212694	4.7
Tecamac	123218	172813	3.5
Teoloyucan	41964	66556	4.8
Tepozotlan	39647	62280	4.7
Texcoco	140368	204102	3.8
Tlalnepantla	702807	721415	0.3
Tultepec	47323	93277	7.1
Tultitlán	246464	432141	5.8
Zumpango	71413	99774	3.4

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



**PROYECCIÓN DE POBLACION AL AÑO 2010  
DE LOS 27 MUNICIPIOS CONURBADOS AL DISTRITO FEDERAL  
METODO INTERES COMPUESTO**

MUNICIPIO	PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN		
	2000	2000	2010
Acolman	61250	58160	87238
Atenco	34435	27428	56091
Atizapan	467886	489484	699274
Coacalco	252555	238449	419289
Cuautitlan I.	452976	613355	626699
Cuautitlan	75836	60144	117771
Chalco	217972	1021643	167491
Chicoloapan	77579	77765	105276
Chimalhuacan	490772	946699	1002127
Ecatepec	1622697	1891726	2159689
Huixquilucan	193468	223222	283638
Ixtapaluca	297570	241383	648405
Jaltenco	31629	65923	44187
Melchor O.	37716	37976	54765
Naucalpan	858717	847574	939208
Nezahualcoyotl	1225972	1176815	1201672
Nextlalpan	19532	15892	35310
Nicolás Romero	269546	299934	395174
Paz La	212694	182902	336684
Tecamac	172813	180647	243770
Teoloyucan	66556	60932	106365
Tepozotlan	62280	58125	98586
Texcoco	204102	186819	296361
Tlalnepantla	721415	635606	743352
Tultepec	93177	97534	185212
Tultitlán	432141	441379	759420
Zumpango	99774	98805	139387
<b>27 Municipios</b>	<b>8753060</b>	<b>10318881</b>	<b>12709645</b>

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## II.4 RESULTADOS GLOBALES

En las siguientes tablas podemos observar las proyecciones al año 2010 a través de los dos métodos utilizados en este capítulo para este fin. Se realiza un promedio entre ambos métodos para obtener dicha proyección para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México:

### RESULTADOS GLOBALES DE LA PROYECCION AL AÑO 2010 DISTRITO FEDERAL

METODO DE APLICACIÓN PARA LA PROYECCION	POBLACIÓN (HABITANTES)	TASA DE CRECIMIENTO (%)
MATRIZ DE LESLIE	7303269	-1.6
INTERES COMPUESTO	8959049	0.4
PROMEDIO DE METODOS	8131159	-0.6

### RESULTADOS GLOBALES DE LA PROYECCION AL AÑO 2010 27 MUNICIPIOS CONURBADOS AL DISTRITO FEDERAL

METODO DE APLICACIÓN PARA LA PROYECCION	POBLACIÓN (HABITANTES)	TASA DE CRECIMIENTO (%)
MATRIZ DE LESLIE	20265976	8.7
INTERES COMPUESTO	12709645	3.8
PROMEDIO DE METODOS	16487811	6.2



**RESULTADOS GLOBALES DE LA PROYECCION DE LA POBLACION DEL DISTRITO FEDERAL Y 27 MUNICIPIOS CONURBADOS AL AÑO 2010**

	CENSO DE POBLACION 2000	PROYECCION DE LA POBLACION 2010
D.F.	8591309	8131159
27 MUNICIPIOS	8753060	16487811
Z.M.C.M.	17344369	24618970

De acuerdo con la tabla anterior se estima que el crecimiento demográfico esperado para el año 2010, la población del Estado de México será de 24,618,970 habitantes, con una preferencia a concentrarse en localidades urbanas, principalmente en los municipios conurbados al Distrito Federal y que conforman la Zona Metropolitana de la Ciudad de México( Acolman, Atenco, Atizapan, Coacalco, Cuautitlan I, Cuautitlan, Chalco, Chicoloapan, Chimalhuacan, Ecatepec, Huixquilucan, Ixtapaluca, Jaltenco, Melchor O, Naucalpan, Nezahualcoyotl, Nextlalpan, Nicolás Romero, Paz La, Tecamac, Teoloyucan, Tepozotlan, Texcoco, Tlalnepantla, Tultepec, Tultitlán, Zumpango )

La demanda y abastecimiento de agua en la ZMCM se ha incrementado notablemente en los últimos años, como consecuencia del crecimiento poblacional y económico. Si consideramos un consumo de 200 litros/habitante/día, para el año 2 010 se tendrá una demanda de 4,923,794,000 litros diarios, para el uso doméstico, cifra que podría duplicarse al incorporar los usos industrial, comercial y agropecuario.

Actualmente una de los principales problemas en el abasto de agua potable se presenta en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, ya que se suministran alrededor de 59 m3/s de este recurso y 4.5 m3/s de agua residual tratada, para satisfacer las demandas de la ciudad. No obstante lo anterior, el abasto de agua, deberá crecer al menos al ritmo de la población lo cual significa que se deba dotar de 19 a 30 m3/s adicionales, en los próximos quince años.

Ante tal situación, se tendrá que resolver el problema de abastecimiento a través de convenios con regiones aledañas, que liberen a los actuales sistemas, ya que actualmente se obtienen 32 m3 / segundo, de los mantos acuíferos del valle de México, 19 m3 / segundo del Sistema Cutzamala, 6 m3 / segundo de acuíferos de Valle de Lerma y los restantes de manantiales ríos y presas, es por esta situación que la extracción de grandes volúmenes de agua están ocasionando serios desequilibrios ecológicos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## **CAPITULO III.**

### **DESCRIPCION DE SISTEMAS DE RECARGA ARTIFICIAL.**

#### **III.1 RECARGA ARTIFICIAL**

Al proceso mediante el cual se produce un aumento del almacenamiento de agua subterránea en un acuífero se le llama **RECARGA ARTIFICIAL**, su origen data de principios de siglo XIX, en que se comenzó a utilizar en Europa, en si, es una medida de ingeniería que consiste en una serie de técnicas, siendo los principales objetivos:

- Restaurar un acuífero sobre explotado.

A causa del continuo aumento de la demanda local de agua, el acuífero de la Ciudad de México ha sido progresivamente sobre explotado, trayendo así mayores consecuencias.

- Disminuir el constante hundimiento del terreno.

Con el creciente bombeo efectuado en el periodo que va de 1948 a 1953, el hundimiento había llegado a los 46 centímetros por año en algunas áreas. De acuerdo con la Gerencia de Aguas del Valle de México, el hundimiento neto en los últimos cien años ha hecho descender el nivel del suelo de la ZMVM un promedio de 7.5 metros.

- Almacenamiento de agua para uso futuro

A partir de 1995 la demanda en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, crece a razón de 1.4 m<sup>3</sup>/s al año. Las necesidades actuales de agua son superiores a 78 m<sup>3</sup> por segundo, ya que de 1995 al presente se ha acumulado un déficit potencial de 7 m<sup>3</sup>/s, que debería haber sido subsanado con la incorporación de los 5m<sup>3</sup>/s del Temascaltepec.

- Reducir la importación de agua de cuencas externas.

Los constantes problemas de la sobre explotación del acuífero local, han obligado a buscar fuentes adicionales cada vez mas alejadas: primero Lerma, luego Cutzamala y ahora se esta tratando de vencer a la población del Temascaltepec (a 140 kms. de distancia) que nos permitan traernos parte de su agua y para el futuro, los ingenieros hidráulicos ya estudian cuencas aun más distantes.



La recarga artificial se practica en acuíferos libres que tienen su nivel de agua a profundidad intermedia o próxima a la superficie y están constituidos por materiales granulares, como son los depósitos aluviales y las areniscas o por materiales consolidados como son las calizas y las dolomías fracturadas.

También se puede efectuar en acuíferos confinados, en materiales granulares relativamente cementados, o en consolidados con ligera fisuración. En estos casos los caudales de admisión de los dispositivos de recarga son menores, presentándose además, en general, mayores problemas de colmatación debido a los sólidos en suspensión que lleva el agua que se recarga.

Los procedimientos ideados para poder introducir el agua en el acuífero son múltiples y variados, aunque resulta muy clásico el establecimiento de dos grandes grupos de métodos en función de que la recarga se efectúe bien por filtración a través de la superficie, o bien por introducción directa del agua hasta el acuífero mediante una perforación o pozos que lo atraviesa

El presente capítulo se enfocará a describir los principales Métodos de la recarga artificial en el acuífero, y como ya se ha mencionado, se tiene así dos tipos de sistemas principales de recarga artificial:

**a)- EN SUPERFICIE**

**b)- EN PROFUNDIDAD**

Los cuales son descritos a continuación.



### **III.2 RECARGA EN SUPERFICIE.**

En términos generales, los sistemas de recarga artificial superficial son los más recomendables ya que su costo es menor y el volumen de agua infiltrado es mayor.

La restricción para su utilización se debe a la presencia de capas de baja permeabilidad en superficie o en el intervalo entre el acuífero y la superficie, a niveles freáticos muy profundos a zonas de topografía muy irregular y problemas legales y sociales en cuanto a disponibilidad de terreno.

Los métodos de recarga en superficie presentan menos complicaciones técnicas que los dispositivos de recarga artificial en profundidad. Como regla general se podría indicar que a igualdad de eficiencia siempre es preferible la técnica constructiva más sencilla.

A continuación se mencionarán los Métodos más utilizados en la recarga artificial en superficie de acuíferos:

#### **a) *Lagunas o vasos de infiltración:***

Consiste en construir una serie de estanques sobre el terreno permeable para que así se lleve a cabo la infiltración.

Generalmente en el fondo se coloca un filtro de grava - arena con el fin de retener las partículas finas que pudieran taponar los canalillos del medio transmisor, y de tal manera en ciclos de operación y secado del tanque se renuevan los filtros y se raspa el fondo de dichos tanques para mantener sus condiciones de permeabilidad, cada estanque tiene sus obras de llenado y vaciado para poder operar independientemente y así se combinen las actividades de inundación y mantenimiento dentro del sistema.

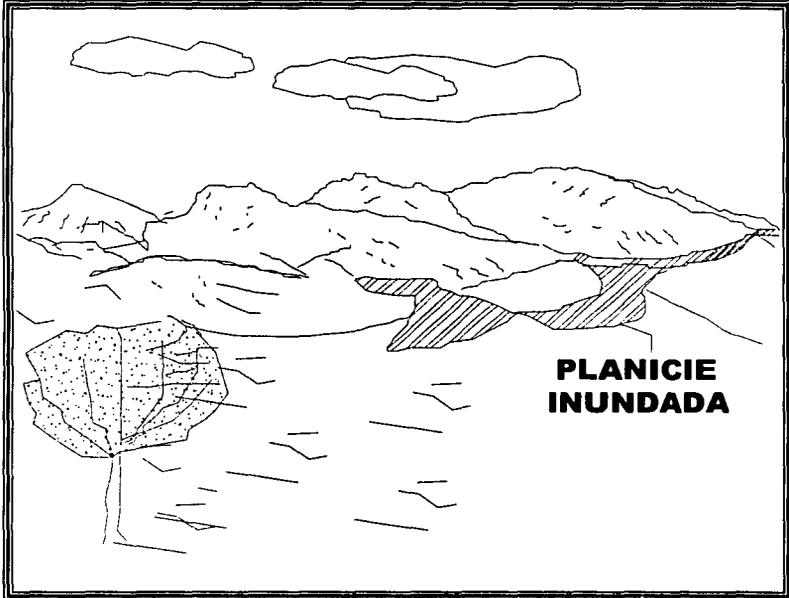
El agua infiltrada generalmente pasa por estructuras de retención de azolves y de tratamiento.

En alguno casos este método se utiliza como complemento en el tratamiento y para almacenar aguas residuales tratadas, como se mencionó anteriormente, en dicho caso se deben extremar precauciones de no contaminar acuíferos o pozos que sean productores de agua potable.



**b) Planicies de Inundación:**

Es la inundación de terrenos, consiste en derivar aguas hacia zonas donde exista material con alta capacidad de infiltración complementando las obras con la construcción de diques y otras estructuras que eviten el desbordamiento de las aguas. De hecho este método es una gran laguna o vaso de infiltración de forma irregular.



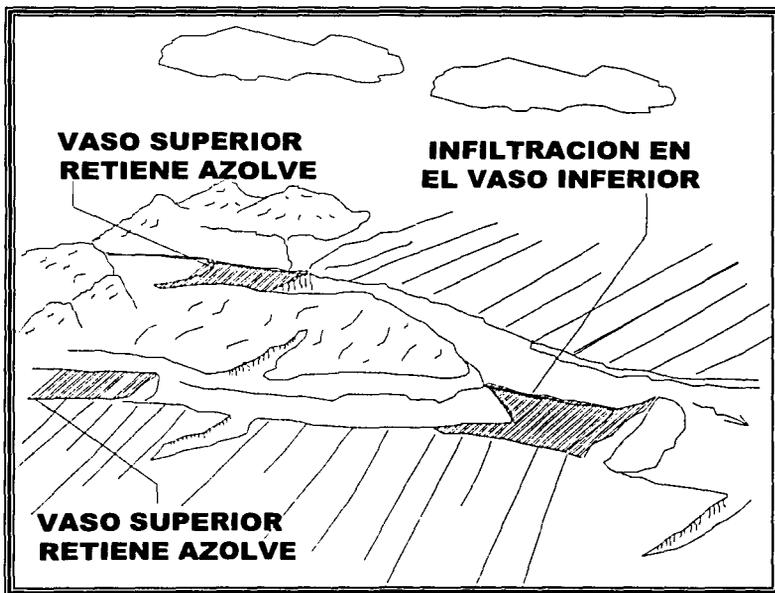
**Recarga artificial a través de Planicies de inundación**

TERREO CON  
FALLA DE ORIGEN



### c) Vasos Escalonados

En corrientes donde el terreno es de alta permeabilidad, conviene construir vasos escalonados, los cuales tienden a regular el gasto, reducen la velocidad del agua, y con esto se aumenta el área de contacto y tirante, todo esto provocando una mayor infiltración. En especial los vasos de aguas arriba deben tener mayor capacidad de retención de azolves para que así los vasos de aguas abajo no pierdan capacidad de infiltración por la sedimentación de partículas finas. El reducir la pendiente del cauce o despalmar la cubierta de suelo así modificar el curso hacia otro cause más permeable son acciones recomendables al hacer uso de este sistema. La utilización de vasos escalonados es de gran ayuda donde se presentan lluvias torrenciales e intermitentes.



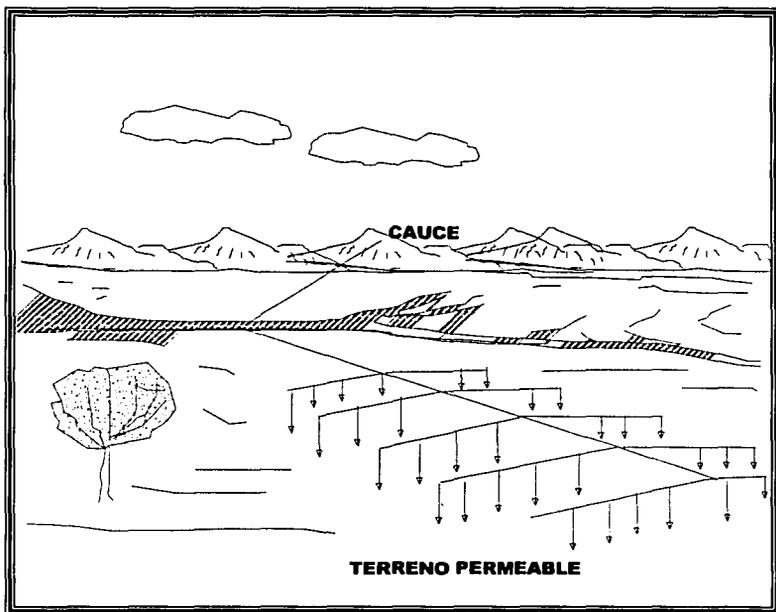
*Recarga artificial a través de vasos escalonados*



#### d) Zanjas de Infiltración

Donde las condiciones topográficas sean adversas o donde no sea factible la construcción de grandes obras como lagunas de infiltración, las zanjas y trincheras excavadas en el terreno son una alternativa para poder aumentar la infiltración en zonas con alta permeabilidad y excedente de agua superficial.

La distribución y forma de las zanjas es variable (por lo general es en forma de peine), pueden tener 0.5m de ancho y su configuración puede ser paralela, en forma ramificada o siguiendo la forma del relieve.



*Recarga Artificial a través de Zanjas de infiltración*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



*e) Tajos de Infiltración:*

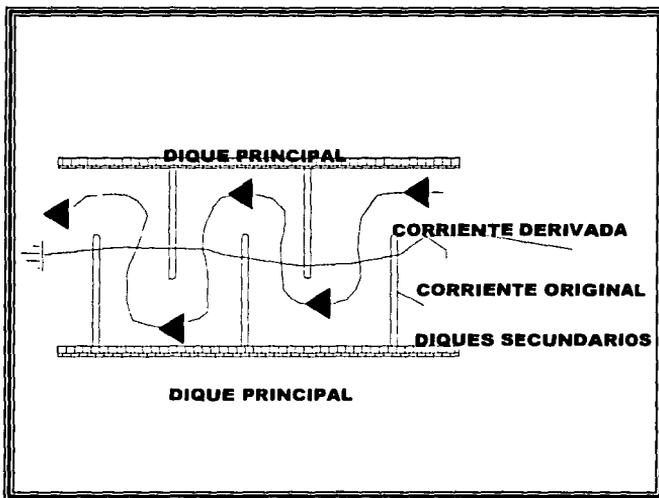
Este tipo de método se puede aplicar en excavaciones a cielo abierto de material permeable que hayan sido abandonadas tales como minas de arena y en algunos casos en tajos excavados con el fin de infiltrar agua.

La ventaja de éste método es que tiene capacidad de almacenamiento y por lo tanto, se le pueden dar usos múltiples. Además, el área de infiltración se incrementa debido al desarrollo de los taludes y por la inclinación de estos el mantenimiento únicamente es necesario en el fondo del tajo.

*f) Modificación de Corrientes:*

En zonas muy llanas donde existen corrientes superficiales, la aplicación del método de modificación de corrientes es muy útil, ya que aumenta el tiempo de recorrido de la corriente y la zona de recarga.

Este sistema está formado por dos diques principales que limitan la zona a recargar y, perpendicularmente a estos, se establecen otros diques secundarios que cortan la corriente y la obligan a aumentar el tiempo de recorrido.



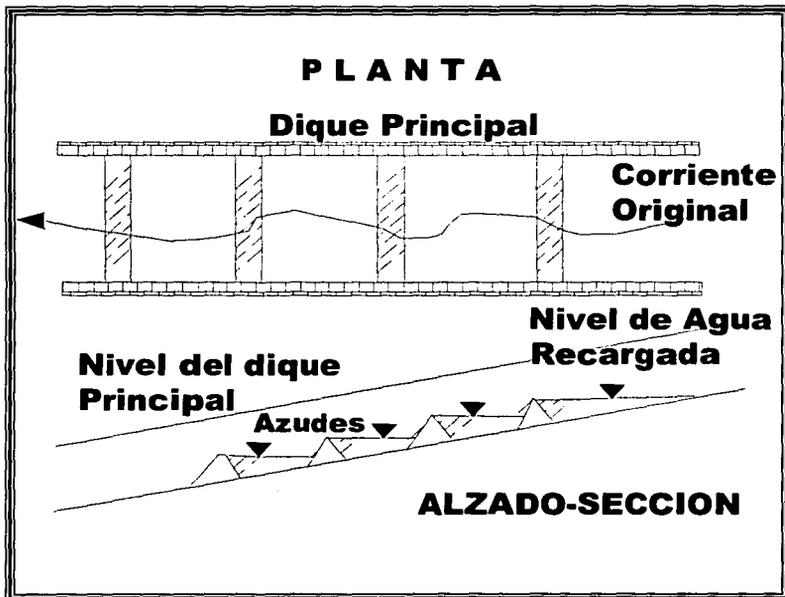
*Recarga artificial a través de Modificación de Corrientes*



**g) Zonas Inundadas:**

Con el método de Zonas Inundadas, se crea una pequeña lámina de agua que se retiene por medio de azudes de muy poca altura y con la que se recarga el acuífero.

Para que la infiltración sea máxima, es preciso que la velocidad del agua superficial sea muy pequeña con el fin de no arrastrar la vegetación existente que ayuda a la recarga, por lo tanto, la pendiente natural del terreno debe ser muy pequeña.



*Recarga artificial a través de Zonas Inundadas*



### **III.3 RECARGA EN PROFUNDIDAD.**

La utilización de métodos profundos consiste básicamente en pozos de inyección, resolviendo los problemas de espacio en superficie, y conducen agua hasta la profundidad donde se encuentran los mantos acuíferos (de entre 50 y 300 m), ya que una recarga en superficie tardaría muchos años en infiltrar agua al subsuelo.

Los pozos son los sistemas de recarga artificial más utilizados cuando el acuífero se encuentra a una cierta profundidad. Su uso también es frecuente en los casos en los que la disponibilidad de terrenos es restringida.

Dentro de los sistemas o métodos más comunes en la recarga en profundidad encontramos:

#### **a) Pozos de Verticales de Inyección:**

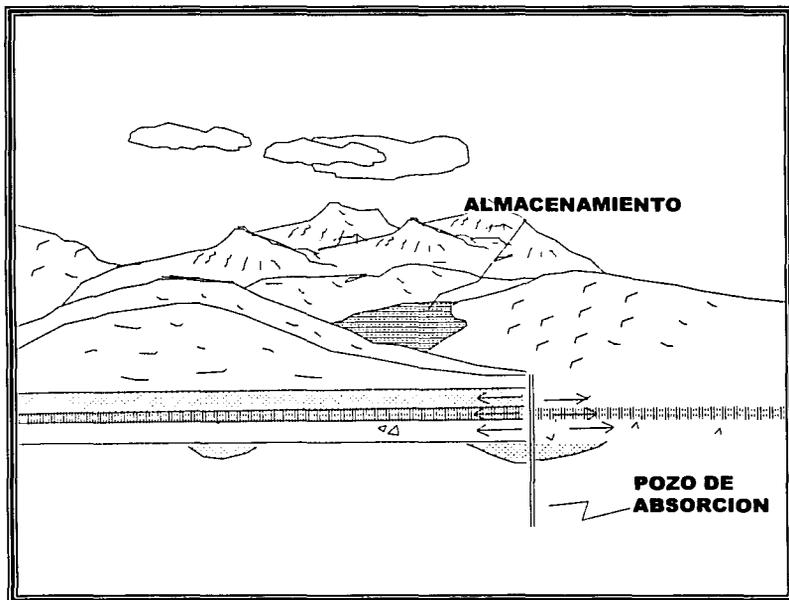
Como se ha mencionado este método es una alternativa para recarga de acuíferos confinados o semiconfinados o donde el nivel freático esté muy profundo, también es utilizado donde no hay disponibilidad de área para métodos superficiales ya sea por relieve o por invasión urbana.

Debido al mayor costo y generalmente a un menor rendimiento que los métodos superficiales es conveniente utilizarlo con fines múltiples tales como prevenir la intrusión salina.

La construcción de estos pozos es similar a los de extracción y el fenómeno hidráulico es muy parecido, los gastos varían un poco debido a fenómenos de histéresis en el acuífero y a la acumulación de material físico – químico o bacteriológico en el límite del pozo con la formación receptora. Sin embargo, un buen mantenimiento consiste en pistoneo, cloración y bombeo periódico puede llegar a conservar niveles eficientes de gastos de infiltración.



Por estas razones, en muchas partes se utilizan pozos con doble propósito, es decir, inyección y bombeo y en localidades donde se tengan varios acuíferos separados por capas de acuitardos, un pozo puede alimentar a las diferentes formaciones permeables.



*Recarga artificial a través de Pozos verticales de Inyección*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



***b) Pozos de Colectores Horizontales.***

En el caso de que los estratos superficiales del medio poroso sean relativamente impermeables, no se puede utilizar los métodos del sistema de recarga en superficie, sin embargo, si el espesor total de éstos estratos no es excesivo, es decir, entre 2 y 3 metros, se pueden excavar zanjas colocando en su interior tubos colectores horizontales. La utilización de éste método está condicionado por la existencia de una corriente de agua superficial a las proximidades de la zanja.

Los taludes de las zanjas deben ser lo más verticales posible, con el fin de que el fango y las materias en suspensión que se puedan producir caigan al fondo, permitiendo la infiltración por sus paredes; se debe tener cuidado en extraer periódicamente el fango producido para impedir que los tubos colectores se obstruyan.



## **CAPITULO IV.**

### **FUENTES DE CAPTACION Y DISTRIBUCION DE AGUA RESIDUAL.**

"Depuración de aguas residuales" es el nombre que reciben los distintos procesos implicados en la extracción, tratamiento y control sanitario de los productos de desecho arrastrados por el agua y procedentes de viviendas e industrias. La depuración cobró importancia progresivamente desde principios de la década de 1970 como resultado de la preocupación general expresada en todo el mundo sobre el problema, cada vez mayor, de la contaminación humana del medio ambiente, desde el aire, a los ríos, lagos, océanos y aguas subterráneas, por los desperdicios domésticos, industriales, municipales y agrícolas.

#### **IV.1 HISTORIA**

Los métodos de depuración de residuos se remontan a la antigüedad y se han encontrado instalaciones de alcantarillado en lugares prehistóricos de Creta y en las antiguas ciudades asirias. Las canalizaciones de desagüe construidas por los romanos todavía funcionan en nuestros días. Aunque su principal función era el drenaje, la costumbre romana de arrojar los desperdicios a las calles significaba que junto con el agua de las escorrentías viajaban grandes cantidades de materia orgánica. Hacia finales de la edad media empezaron a usarse en Europa, primero, excavaciones subterráneas privadas y, más tarde, letrinas. Cuando éstas estaban llenas, unos obreros vaciaban el lugar en nombre del propietario. El contenido de los pozos negros se empleaba como fertilizante en las granjas cercanas o era vertido en los cursos de agua o en tierras no explotadas.

Unos siglos después se recuperó la costumbre de construir desagües, en su mayor parte en forma de canales al aire o zanjas en la calle. Al principio estuvo prohibido arrojar desperdicios en ellos, pero en el siglo XIX se aceptó que la salud pública podía salir beneficiada si se eliminaban los desechos humanos a través de los desagües para conseguir su rápida desaparición. Un sistema de este tipo fue desarrollado por Joseph Bazalgette entre 1859 y 1875 con el objeto de desviar el agua de lluvia y las aguas residuales hacia la parte baja del Támesis, en Londres. Con la introducción del abastecimiento municipal de agua y la instalación de cañerías en las casas llegaron los inodoros y los primeros sistemas sanitarios modernos. A pesar de que existían reservas respecto a éstos por el desperdicio de recursos que suponían, por los riesgos para la salud que planteaban y por su elevado precio, fueron muchas las ciudades que los construyeron.



A comienzos del siglo XX, algunas ciudades e industrias empezaron a reconocer que el vertido directo de desechos en los ríos provocaba problemas sanitarios. Esto llevó a la construcción de instalaciones de depuración. Aproximadamente en aquellos mismos años se introdujo la fosa séptica como mecanismo para el tratamiento de las aguas residuales domésticas tanto en las áreas suburbanas como en las rurales. Durante la segunda década del siglo, el proceso del lodo activado, desarrollado en Gran Bretaña, supuso una mejora significativa por lo que empezó a emplearse en muchas localidades de ese país y de todo el mundo. Desde la década de 1970, se ha generalizado en el mundo industrializado la cloración, un paso más significativo del tratamiento químico.

## **IV.2 ORIGEN DEL AGUA RESIDUAL**

Las aguas residuales tienen un origen doméstico, industrial, subterráneo y meteorológico, y estos tipos de aguas residuales suelen llamarse respectivamente, domésticas, industriales, de infiltración y pluviales.

Las aguas residuales domésticas son el resultado de actividades cotidianas de las personas. La cantidad y naturaleza de los vertidos industriales es muy variada, dependiendo del tipo de industria, de la gestión de su consumo de agua y del grado de tratamiento que los vertidos reciben antes de su descarga.

La infiltración se produce cuando se sitúan conductos de alcantarillado por debajo del nivel freático o cuando el agua de lluvia se filtra hasta el nivel de la tubería. Esto no es deseable, ya que impone una mayor carga de trabajo al tendido general y a la planta depuradora. La cantidad de agua de lluvia que habrá que drenar dependerá de la pluviosidad así como de las escorrentías o rendimiento de la cuenca de drenaje.

Un área metropolitana estándar vierte un volumen de aguas residuales entre el 60 y el 80% de sus requerimientos diarios totales, y el resto se usa para lavar coches y regar jardines, así como en procesos como el enlatado y embotellado de alimentos.

## **IV.3 TRANSPORTE DE LAS AGUAS RESIDUALES**

Las aguas residuales son transportadas desde su punto de origen hasta las instalaciones depuradoras a través de tuberías, generalmente clasificadas según el tipo de agua residual que circule por ellas. Los sistemas que transportan tanto agua de lluvia como aguas residuales domésticas se llaman combinados. Generalmente funcionan en las zonas viejas de las áreas urbanas. Al ir creciendo las ciudades e imponerse el tratamiento de las aguas residuales, las de origen doméstico fueron separadas de las de los desagües de lluvia por medio de una red separada de tuberías. Esto resulta más eficaz porque excluye el gran volumen de líquido que representa el agua de escorrentía. Permite mayor flexibilidad en el trabajo de la planta depuradora y evita la contaminación originada por escape o desbordamiento que se produce cuando el conducto no es lo bastante grande para transportar el flujo combinado.



Las instalaciones domésticas suelen conectarse mediante tuberías de arcilla, hierro fundido o PVC de entre 8 y 10 cm de diámetro. El tendido de alcantarillado, con tuberías maestras de mayor diámetro, puede estar situado a lo largo de la calle a unos 1,8 m o más de profundidad. Los tubos más pequeños suelen ser de arcilla, hormigón o cemento, y los mayores, de cemento reforzado con o sin revestimiento. A diferencia de lo que ocurre en el tendido de suministro de agua, las aguas residuales circulan por el alcantarillado más por efecto de la gravedad que por el de la presión. Es necesario que la tubería esté inclinada para permitir un flujo de una velocidad de al menos 0.46 m por segundo, ya que a velocidades más bajas la materia sólida tiende a depositarse. Los desagües principales para el agua de lluvia son similares a los del alcantarillado, salvo que su diámetro es mucho mayor. En algunos casos, como en el de los sifones y las tuberías de las estaciones de bombeo, el agua circula a presión.

Las canalizaciones urbanas acostumbran a desaguar en interceptores, que pueden unirse para formar una línea de enlace que termina en la planta depuradora de aguas residuales. Los interceptores y los tendidos de enlace, contruidos por lo general de ladrillo o cemento reforzado, miden en ocasiones hasta 6 m de anchura.

#### **IV.4 RECOLECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN LA ZMCM**

Un solo sistema de recolección o de drenaje funciona tanto para las áreas de servicio del Distrito Federal como para las del Estado de México en la ZMVM. Cada área de servicio tiene su propia red de drenaje; sin embargo, todos los drenajes descargan eventualmente en los interceptores generales del sistema general de drenaje, el cual conduce las aguas residuales por cuatro salidas artificiales localizadas en el extremo norte de la cuenca. En el Distrito Federal, la red del sistema abarca cerca de 10,000 kilómetros de largo, con 68 estaciones de bombeo, numerosos diques y lagunas para controlar el flujo, 111 kilómetros de canales abiertos, 42 kilómetros de ríos utilizados principalmente para drenaje y 118 kilómetros de túneles.

Según el censo de 2000 (INEGI, 2000), el 88 por ciento de los 21 millones de habitantes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México recibe los servicios del sistema de drenaje; el 6 por ciento, aproximadamente, utiliza fosas sépticas, y alrededor del 6 por ciento no posee ningún sistema de drenaje. Sin embargo, las diferencias en el interior de las áreas de servicio son notables, y en algunas delegaciones un sistema de drenaje sirve a menos de la mitad de los residentes.

Las descargas de aguas residuales domésticas e industriales, así como el agua de lluvia, se recolectan en una red secundaria consistente en un pequeño sistema de tuberías por vecindario; después, son conducidas a través de la red principal al Sistema General de Drenaje, para ser expulsadas de la cuenca hacia el norte. El Estado de México reporta que el flujo total en tiempo de seca para la ZMVM (flujo que consiste principalmente en aguas residuales municipales sin tratar) se estima en 44.4 mcs (Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento, 1993). En época de lluvias, la región recibe muchas tormentas de gran intensidad y corta duración. Una sola tormenta puede producir hasta 70 milímetros de lluvia (alrededor de 3 pulgadas), lo que representa un 10 por ciento del total de la precipitación anual.



Debido al patrón de lluvias y a lo irregular del terreno, el sistema de drenaje general fue diseñado para acarrear  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  en un periodo de 45 horas (Departamento del Distrito Federal, 1969).

Dos plantas para tratamiento de agua procesan las fuentes de agua superficial en la Cuenca de México antes de enviarla a la ZMCM. En el Distrito Federal opera la planta del Río Magdalena, la cual aplica un proceso a base coagulación/floculación, sedimentación por gravedad, filtración de arenas rápidas y desinfección con cloro. La Comisión Nacional del Agua opera una planta de aguas superficiales en la presa Madin, que abastece al área de servicio del Estado de México y emplea un proceso de tratamiento similar al de la planta Magdalena.

La Comisión Nacional del Agua se encarga de dar tratamiento al agua importada del río Cutzamala en la planta llamada Los Berros. Éste consiste en precloración, coagulación/floculación, sedimentación por gravedad y filtración de arenas rápidas. Por lo general, dicha planta trata  $10.6 \text{ m}^3/\text{s}$  de agua es decir que de algún modo opera por encima de su capacidad ( $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Los tratamientos se efectúan cerca de la fuente de extracción, antes de que el agua penetre al sistema Lerma - Cutzamala para ser transportada a la ZMCM.

El tratamiento de las fuentes de agua subterránea consiste en aplicarles el procedimiento de cloración para obtener un valor de cloro residual total de 2.0 miligramos/litro, antes de que ingresen al sistema de distribución. De manera adicional, existen 326 estaciones de recloración a lo largo del sistema de distribución, que tienen por objeto mantener el cloro residual a nivel conveniente.

El Distrito Federal posee tres plantas de tratamiento, diseñadas originalmente para influir en los niveles de tratamiento avanzado del agua subterránea, incluyendo la extracción de gases disueltos, coloración, turbidez, hierro, reducción de la dureza, filtración y cloración. Estas antiguas plantas se encuentran en malas condiciones y de acuerdo con la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal (DGCOH), ahora sólo aplican la desinfección con cloro. Sin embargo, existen otras plantas piloto que realizan tratamientos avanzados de agua subterránea, en forma experimental.



#### **IV.5 TRATAMIENTO DE AGUAS DE RESIDUALES**

Los problemas relacionados con el manejo, tratamiento y eliminación de los residuos fecales sólidos que suelen generarse en las plantas de tratamiento de aguas residuales, constituyen un tema de la mayor importancia. Estos residuos pueden ser peligrosos si no se tratan o se desechan en forma adecuada. Sin embargo, ya que el tratamiento de aguas residuales en la ZMCM se lleva a cabo principalmente con el propósito de rehúso más que de tratarlas para su eliminación, los residuos contenidos son aparentemente vertidos nuevamente al drenaje, sin ningún tratamiento.

Por lo general, el 90 por ciento de las aguas residuales municipales de la ZMVM permanece sin tratamiento y se desvía al exterior de la Cuenca de México a través del sistema general de drenaje. Las aguas residuales sin tratar se utilizan para irrigar 80,000 hectáreas de sembradíos en el Valle del Mezquital, en el Estado de Hidalgo, hacia el norte. La corriente que regresa de la irrigación se drena hacia tributarios del río Panuco, el cual desemboca en el Golfo de México.

Solo el 10 por ciento de las aguas residuales tratadas en la ZMVM se reutiliza a nivel local en distintos proyectos, tales como la recarga de agua subterránea y la irrigación del paisaje urbano en la ciudad.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales en el Distrito Federal están especialmente ubicadas para abastecer a determinadas zonas dentro del área de servicio. Por lo tanto, las características de las aguas residuales sin tratar pueden ser distintas en cada planta, dependiendo del origen del agua - residual, doméstico o industrial.

#### **IV.6 REUTILIZACIÓN Y RECICLAJE DE AGUA**

Por reutilización del agua se entiende la práctica de recuperar aguas degradadas para emplearlas, luego de aplicarles un nivel de tratamiento adecuado, con fines prácticos. Por reciclaje del agua se entiende la captura y recuperación de aguas degradadas, para volver a usarlas en el mismo proceso que las generó; a menudo, el reciclaje puede llevarse a cabo sin un tratamiento excesivo del agua. Las aguas residuales municipales, que incluyen el agua generada en residencias, establecimientos comerciales, y a menudo en instalaciones industriales, son la fuente de agua de rehúso de que se dispone más a menudo, luego de aplicárseles un grado satisfactorio de tratamiento. Otras fuentes de agua degradada han sido tomadas en cuenta para su rehúso. Sin embargo, la calidad de estas otras fuentes es menos predecible que la del agua municipal tratada, por lo que la conveniencia o no de su rehúso no es tan segura.



Las actividades de reúso del agua en la ZMCM comenzaron de manera oficial en 1984, con el Programa Nacional de Uso Eficiente del Agua (Departamento del Distrito Federal, 1990b). Los proyectos para el reúso del agua formaron parte de un programa más amplio destinado a reducir la pérdida de agua y mejorar los ingresos económicos por este concepto.

Durante el periodo 1990-1992, el programa se concentró en varias actividades para el reúso del agua en la ZMCM, que incluyeron la protección de las zonas naturales de recarga del acuífero, la recarga del acuífero con agua de lluvia y aguas residuales municipales recuperadas, así como el uso de aguas residuales recuperadas de los sectores industrial y de servicios.

En el área de servicio del Distrito Federal, el agua residuales tratada y rehusada se distribuyen de la manera siguiente: 83 por ciento para la irrigación del paisaje urbano y depósitos en áreas recreativas; 10 por ciento para uso industrial; 5 por ciento para irrigación agrícola; 2 por ciento para usos comerciales, como, por ejemplo, el lavado de automóviles (Departamento del Distrito Federal, 1992b).

Actualmente, el agua residual tratada se distribuye y reutiliza en el Distrito Federal de la siguiente forma (Plan de Acciones Hidráulicas 2001-2005):

#### **a) IZTACALCO**

- Las aguas tratadas en la delegación Iztacalco son utilizadas principalmente para el riego de áreas verdes, ya que dentro de esta delegación existen 2.43 km<sup>2</sup> integrados por deportivos, parques y camellones jardinados.

Actualmente se cuenta con 47.170 Km. de red de distribución y dos plantas de tratamiento de aguas residuales con capacidad de 245 l/s. Es importante mencionar que esta planta de tratamiento beneficia a las delegaciones Iztacalco, Benito Juárez y Coyoacán, a través de dos líneas de 30 centímetros de diámetro que corren por las avenidas Río Churubusco y Plutarco Elías Calles. La infraestructura se complementa con dos garzas que se utilizan para rellenar los carros tanque que irrigan las zonas que no cuentan con red.

#### **b) COYOACAN**

- El uso del agua residual tratada en la delegación Coyoacán esta destinado al riego de áreas verdes principalmente, el cual se realiza a través de una red de distribución de 31.89 Km. de longitud aproximadamente.

Existen dos plantas de tratamiento con una capacidad conjunta de 1,340 l/s; uno para abastecer a los viveros de Coyoacán, y otro para contribuir a incrementar el gasto del río Magdalena.

Por otra parte, se complementa con cuatro garzas de agua tratada, para llenar los carros tanque que abastecen las zonas donde no se cuenta con red de distribución.



**c) BENITO JUAREZ**

- En la delegación Benito Juárez, actualmente, no se cuenta con plantas de tratamiento. El agua tratada que se utiliza proviene de las plantas Coyoacán y Ciudad Deportiva, ubicadas en las delegaciones Coyoacán e Iztacalco, respectivamente.

Esta delegación cuenta con 22 kilómetros de líneas de agua tratada de 10 a 30.5 cm. de diámetro. Para regar las zonas que no cuentan con infraestructura se utilizan carros tanque, que son llenados con cuatro garzas existentes en esta delegación, una de las cuales se encuentra cancelada.

**d) AZCAPOTZALCO**

- En la delegación Azcapotzalco existe 1.0 km<sup>2</sup> de áreas verdes, principalmente camellones, parques y jardines, y para poder mantener irrigada estas áreas, la delegación cuenta con 52,100 metros de red de agua residual tratada. El agua residual tratada que se produce en la delegación es utilizada para el riego de 0.82 km<sup>2</sup> de estas áreas, Además de alimentar al lago ubicado dentro del parque Tezozómoc. Para esto, se cuenta con la planta de tratamiento de aguas residuales El Rosario y cuatro garzas de agua tratada para rellenar los carros cisterna, que riegan dichas áreas.

Con el propósito de promover e incrementar la sustitución de agua potable por agua residual tratada en la ciudad, en 1990 el Departamento del D.F. concesionó la operación, mantenimiento, y comercialización de la planta de tratamiento de aguas residuales Acueducto de Guadalupe al grupo de industriales de Vallejo. Esta planta se ubica en la delegación Gustavo A. Madero, y su efluente ya tratado es utilizado para el riego de las áreas verdes de la misma delegación y en los procesos industriales de la zona industrial Vallejo de ésta delegación.

**e) ALVARO OBREGON**

- En la delegación Alvaro Obregon se cuenta con 250 hectáreas de zonas verdes, de las cuales aproximadamente 110 hectáreas requieren agua residual tratada para riego, estimando que en esta delegación se cuenta con una cobertura del 95% de este servicio, siendo suministrada el agua residual tratada que se consume, por las plantas de tratamiento Bosque de Chapultepec y Coyoacán.

Existen dos líneas de distribución, Las Aguilas y Batallón de San Patricio, ambas suman aproximadamente 13 km., con diámetro variable de 10, 15 y 30 cm.

Se riegan aproximadamente 110 hectáreas que comprenden el Deportivo Batallón de San Patricio, panteón Jardín y los camellones jardinados en las avenidas Mixcoac y Barranca del Muerto, principalmente.



### **f) MIGUEL HIDALGO**

- La demanda de agua para el riego de aproximadamente 1,070 hectáreas, ha llevado a la optimización del manejo, distribución, aprovechamiento y rehúso de las aguas residuales para rescatar volúmenes apreciables de agua potable en aplicaciones tales como el riego a 700 hectáreas, lo que representa 63% del nivel de cobertura en zonas que requieren de riego.

La delegación Miguel Hidalgo cuenta con dos plantas de tratamiento aportando en forma conjunta 173 l/s, y proporcionan un nivel de tratamiento secundario mediante el procedimiento de lodos activados. Para mejorar el servicio de distribución del agua tratada por las plantas, se cuenta con tanques de almacenamiento ubicados en el Bosque de Chapultepec; así mismo se cuenta con plantas de bombeo para llevar el caudal tratado por las plantas a los tanques de almacenamiento y de ahí distribuirá por gravedad a los usuarios.

Para el suministro de agua a carros tanque se tiene cinco garzas, dos ubicadas junto a la planta de tratamiento Chapultepec, otra junto al parque de convivencia infantil en la primera sección de Chapultepec, al final del río Hondito y posteriormente en la planta Bosques de las Lomas y la Díaz Mirón, frente al hospital de la mujer.

En cuanto a su aprovechamiento, se riegan aproximadamente 700 hectáreas, integradas por el Bosque de Chapultepec en sus secciones, los camellones jardinados de paseo de las palmas, paseo de la Reforma y avenida Presidente Masarik, parque América, Plaza Uruguay, Campo Marte, Los Pinos, Deportivo Mundet, Deportivo Chapultepec, además del llenado de los lagos recreativos de Chapultepec, en la primera y segunda sección.

Ante la demanda de agua en usos donde no se requiera la calidad de potable, se ha buscado optimizar el manejo y distribución del agua residual tratada mediante la situación de agua tratada por agua potable para el riego de áreas verdes y procesos industriales y de servicios que no requieren la calidad de potable, con lo cual se logra un uso racional del vital líquido, así el nivel de cobertura a que se llegó es del 85%.

### **g) IZTAPALAPA**

- Para el tratamiento del agua residual, en Iztapalapa se tiene la planta Cerro de la Estrella, la cual entró en operación en 1971, actualmente cuenta con tratamiento terciario. Es importante indicar que la fuente de suministro de la planta de tratamiento es la planta de bombeo Aculco, que a través de una línea de 183 cm de diámetro y una longitud aproximada de 6.55 km., abastece a la planta de tratamiento, con capacidad de 4000 l/s; su operación está en función de las épocas de estiaje y lluvias, en estiaje opera a su máxima capacidad; en época de lluvias disminuye su caudal.



#### **h) XOCHIMILCO**

- La delegación Xochimilco utiliza el agua tratada para el riego de sus áreas verdes así como el llenado de canales y lagos recreativos manteniendo los niveles constantes de los mismos y para abastecer a un distrito de riego localizado al sur de Canal Nacional - Canal de Chalco. Para esto la delegación cuenta con plantas de tratamiento y una red de conducción y distribución de 24,950 metros de longitud con diámetros variables (6-36 pulgadas).

#### **i) TLAHUAC**

- En la delegación Tláhuac existen plantas de tratamiento de agua residual, alimentadas por los conductos de los pueblos en donde se ubican y destinarán su caudal procesado a nivel primario y terciario hacia las zonas agrícolas de la zona chinampera de Tláhuac.

En Tláhuac existen 41 kilómetros de tubería con diámetro variable para la conducción de agua tratada, proveniente de la planta de tratamiento Cerro de la Estrella, ubicada en la delegación Iztapalapa, que abastece a los canales de la delegación, así como zonas agrícolas y con dirección hacia el Estado de México, existen también dos derivaciones de la línea principal de agua tratada, una, localizada entre el cruce de las calles Guillermo Prieto y Granados, hasta la confluencia con el canal Caltongo, para el beneficio de los canales de la zona chinampera de Xochimilco.

#### **j) VENUSTIANO CARRANZA**

- La delegación Venustiano Carranza utiliza agua tratada para el riego de sus áreas verdes que suman en total 1.87 km<sup>2</sup> conformadas por parques, jardines, deportivos y camellones jardinados. Para esto, la delegación Venustiano Carranza cuenta con 36,330 metros de red, cuyo volumen proviene de las plantas de tratamiento San Juan de Aragón y Ciudad Deportiva, ubicadas en las delegaciones Gustavo A. Madero e Iztacalco, respectivamente. El 82% de las áreas verdes (1.53 km<sup>2</sup>) irrigadas por medio de la red de distribución y el 18% restante (0.34 km<sup>2</sup>) mediante un programa de riego a través de carros cisterna.

#### **k) TLALPAN**

- En la delegación Tlalpan la infraestructura para el tratamiento y reúso de las aguas negras se ha incrementado considerablemente, a la fecha se han construido cinco plantas de tratamiento a nivel secundario, además de las cuatro pequeñas plantas de tratamiento de uso particular las cuales están ubicadas dentro del parque recreativo "Reino Aventura".



**l) MILPA ALTA**

- En la delegación Milpa Alta, se cuenta con la planta de tratamiento de aguas residuales San Pedro Actopan. La inexistencia de industrias en la zona hace factible un tratamiento primario avanzado de las aguas negras crudas, con una capacidad nominal de 60 l/s y de 35 l/s de operación para aprovechar éstas en el riego de las zonas agrícolas aledañas.

**m) MAGDALENA CONTRERAS**

- Finalmente, la delegación Magdalena Contreras no cuenta con infraestructura para el tratamiento de aguas residuales por lo que a los pocos usuarios existentes se les suministra líquido a través de pipas.

Se estima que la delegación cuenta con 0.18 km<sup>2</sup> de áreas verdes.

**n) CUAUHTEMOC**

- Para abastecer las 1.50 km<sup>2</sup> de áreas verdes existentes en la delegación Cuauhtémoc, se cuenta con 25.66 Km. de redes de distribución de 10 a 30 cm de diámetro y una planta de tratamiento de aguas residuales, que aporta un volumen para irrigar a 0.21 km<sup>2</sup> de áreas verdes de la unidad habitacional Tlatelolco.

**o) CUAJIMALPA**

Se riegan aproximadamente 19.2 hectáreas de áreas verdes y se suministra un caudal anual de 21,672 m<sup>3</sup> mediante carros tanque para áreas verdes y equipamiento urbano. No se cuenta con suministro de aguas residual tratada para industrias.

**p) GUSTAVO A MADERO**

En la delegación Gustavo A. Madero existen dos plantas de tratamiento de aguas residuales consecionadas a particulares, 103 kilómetros de líneas de distribución y tres garzas para abastecer de agua tratada a los carros tanque que se encargan de distribuir el agua residual a las áreas que aun no cuentan con red.

Las áreas verdes existentes en la delegación suman un total de 8.3 km<sup>2</sup> (sin considerar la parte alta de Cuauhtepc), que se irrigan con agua residual tratada. Una importante área de la zona Industrial Vallejo en la delegación Azcapotzalco, utiliza esta calidad de agua en sus procesos industriales, suministrada por la red de distribución con parte del afluente generado por la planta de tratamiento de aguas residuales Acueducto de Guadalupe.



El Estado de México ha implementado un programa específicamente diseñado para aumentar el uso de aguas residuales municipales. Las finalidades del programa incluyen: el desarrollo de estudios de viabilidad para la construcción de sistemas de tratamiento adicional, así como de una red de distribución que reparta las aguas residuales recuperadas para su reúso; la promoción de proyectos de reúso del agua entre los sectores privado y público; la rehabilitación de las plantas existentes para tratamiento de aguas residuales; la preparación de manuales de operación y mantenimiento, así como de otros registros destinados a mejorar la administración de los sistemas de tratamiento y reúso; la preparación de un cálculo cuantitativo del agua potable utilizada en la actualidad para diferentes actividades, que es susceptible de sustituirse con aguas residuales recuperadas. Bajo este programa, las actividades de reúso potencial del agua que incluyen la irrigación agrícola, el uso industrial, el paisaje urbano y la recarga de los acuíferos han sido localizadas dentro de distritos específicos de servicio en el área del Estado de México.

El mercado potencial para las aguas residuales recuperadas varía según el tipo de tratamientos empleados, pero puede verse influenciado por las políticas gubernamentales relativas a las tarifas para el agua y al otorgamiento de las licencias para el uso de aguas residuales.

La recarga artificial de agua subterránea ha sido usada en la región desde 1943 como un método para reducir las inundaciones, y esto todavía se aplica en la actualidad. Los primeros proyectos abarcaban la retención del desbordamiento y la ampliación de la superficie, la modificación de los canales, y los pozos de infiltración. Muchos de estos proyectos se llevaron a cabo en el basalto altamente permeable de las zonas altas y lograron tasas de infiltración muy altas en los periodos de lluvias torrenciales. La recarga artificial usando pozos de inyección se desarrolló primero en el Distrito Federal alrededor de 1953. Se reportaron cifras de inyección de agua de 0.1 a 0.3 m<sup>3</sup>/s; sin embargo, la fuente o la calidad del agua de recarga no se midió en esos primeros proyectos, y la mitad de los pozos fueron cerrados después debido a problemas operacionales. En 1970 se perforaron alrededor de 56 pozos con el propósito de infiltrar el agua de lluvia. Estos pozos tenían la capacidad de manejar en conjunto hasta 35 m<sup>3</sup>/s de agua. Aunque los pozos no estaban diseñados para la recarga, el agua de lluvia llegó probablemente al acuífero. El Gobierno del Distrito Federal está también desarrollando un sistema de represas en las laderas de la Magdalena Contreras, con el fin de recolectar el agua de lluvia y promover la infiltración natural.



## CAPITULO V.

### ACONDICIONAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES PARA RECARGA.

Se sabe que en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, el sistema de drenaje es combinado, ya que capta aguas pluviales y residuales domésticas, además de las aguas residuales industriales. De acuerdo con la C.N.A; el volumen total captado por el drenaje se estima en 54 m<sup>3</sup>/s, que se constituye por el 42.8 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales y 11.2 m<sup>3</sup>/s de aguas pluviales. De estos volúmenes se utilizan 4.75 m<sup>3</sup>/s para rehúso urbano y 38 m<sup>3</sup>/s para riego de cultivos.

Hablando de la calidad del agua residual, sus características son típicas de las aguas de origen urbano, aunque en algunos parámetros pudieran ser de origen industrial.

Conforme a los estudios recientes que ha realizado la C.N.A., se ha demostrado que el uso prolongado de aguas residuales para riego, han empezado a causar deterioro de la calidad de aguas subterráneas a causa de los nitratos, cloruros, carbono total, magnesio, sulfatos, hierro y bacterias coliformes fecales y que además se presentan fuertes problemas de salud en los habitantes de la zona, principalmente entre aquellos que tienen contacto directo con el agua residual.

Es por ello, que la C.N.A. ha realizado estudios para el diseño y construcción de 4 plantas de tratamiento con una capacidad para tratar en total 74.5 m<sup>3</sup>/s, de los cuales 44 provendrán del Gran Canal y del Dren General del Valle, 15 del emisor del poniente, 15 del Emisor Central y 0.5 de escurrimientos del drenaje de la zona de Zumpango.

Cabe señalar que aunque el sistema de drenaje del Valle de México recibe aguas residuales de origen industrial, su influencia no ha limitado hasta ahora su uso para riego, ya que el contenido de metales pesados está muy por debajo de los límites para éste fin.

En lo que se refiere a las aguas residuales que son rehusadas en la Ciudad de México, son sometidas a tratamientos previos al uso, teniendo para este fin 24 plantas operadas por organismos gubernamentales y 44 particulares, aunque el total de la capacidad es de 6.7 m<sup>3</sup>/s, solo siendo el volumen de efluentes secundarios alrededor de 1.5 m<sup>3</sup>/s, los terciarios (efluente secundario + filtración) de 2.44 m<sup>3</sup>/s y los avanzados (adsorción con carbono activado + filtración) de 0.026m<sup>3</sup>/s. En forma general se consideran adecuados dichos efluentes para ser utilizados en el riego de áreas verdes y cultivos.

Cabe mencionar que las platas El Rosario, Iztacalco, Y el sistema piloto de Santa Catarina, tienen calidad suficiente para la recarga de acuíferos, aunque sólo se utiliza para este fin el de Santa Catarina.



## **V.1 CALIDAD DEL AGUA PARA LA RECARGA.**

Puesto que para la recarga artificial de acuíferos se pretende usar agua residuales, éstas deben recibir un grado de pretratamiento suficientemente avanzado como para garantizar la inalteración de la calidad del agua del acuífero, y de esta forma evitar un postratamiento mas complicado y extenso en el punto de recuperación (potabilización) Ese grado de pretratamiento dependerá del método de recarga; por ejemplo, si la recarga se hace por inundación, el nivel de pretratamiento se define tomando en cuenta la capacidad depuradora del suelo que depende, entre otros factores, de sus propiedades físicas y químicas, mismas que deben determinarse en la zona donde se pretenda hacer la recarga, toda vez que el suelo en sí puede funcionar como un sistema de tratamiento constituido principalmente por los procesos de filtración y percolación, adsorción, desorción, reacción e intercambio iónico; en cambio, si la recarga se hace por inyección directa, el agua deberá acondicionarse previamente hasta un nivel tal que no degrade la calidad del acuífero y que no amenace la salud pública.

Para el caso del acuífero del Valle de México, se considera problemático el método de recarga por inundación, debido a que se requieren grandes extensiones de terreno ya que con el tiempo, se pueden producir efectos adversos, por ejemplo, con el tiempo el suelo se satura de contaminantes y el material orgánico retenido, al descomponerse anaeróbicamente, induce la disolución de algunos contaminantes (metales tóxicos entre otros) que pueden llegar al acuífero. Esta situación obliga a pensar que la manera más recomendable para la recarga con agua residual es la de inyección directa de agua tratada al acuífero.

## **V.2 ESTÁNDARES DE CALIDAD DEL AGUA PARA LA RECARGA**

Actualmente en el ámbito internacional no existe una norma específica de calidad de agua para la recarga de acuíferos por inyección, sino que cada país, de acuerdo con su experiencia, fija criterios y guías.

En países como Estados Unidos, siendo el estado de California el primero en tomar medidas para la calidad del agua, se enfoca básicamente a la protección de la salud humana, tomando como base las concentraciones de compuestos y sustancias tóxicas y la presencia de microorganismos.

Por otra parte, en México, existen criterios que norman la calidad del agua tratada para diversos usos y se protege de manera indirecta la calidad del agua de los acuíferos, pero aún no se cuenta con una norma relativa a la calidad del agua para la recarga de acuíferos.

Es importante indicar que para la recarga artificial al acuífero por medio de inyección directa con agua residual tratada, uno de los criterios que deben ser considerados, es que la calidad del agua a inyectar no debe ser menor a la del acuífero donde se considera factible la recarga.



En la tabla 1, se indican los valores promedio de la calidad del agua subterránea en pozos de las zonas donde se ha creído conveniente realizar la recarga del acuífero, (VER ANEXO)

Estas zonas se les ha denominado como:

- 1) *Aeropuerto*
- 2) *Santa Catarina*
- 3) *Estadio Azteca*

En dicha tabla podemos observar que el agua subterránea de mejor calidad es la de la zona del Estadio Azteca, Aeropuerto, y por último la de Santa Catarina. Por ello, las aguas residuales para la recarga deberán someterse a un nivel de tratamiento en el que se alcancen por lo menos los niveles de calidad de las aguas subterráneas de la zona del Estadio Azteca.

### ***V.3 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO***

Existe una gran variedad de procesos y combinación de éstos para condicionar las aguas residuales para sus diversos usos, incluyendo el de potable.

En México la información sobre el tratamiento para la repurificación del agua para uso potable se enfoca en los estudios realizados por la DGCOR, para potabilizar el efluente secundario de la planta de tratamiento de aguas residuales "Cerro de la Estrella".

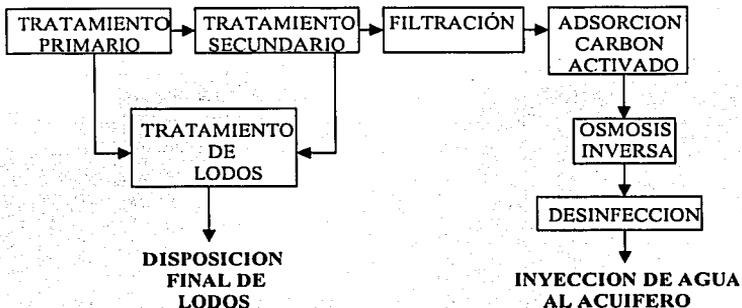
El resultado de este estudio fue la propuesta de tres arreglos de procesos con los que se logra el nivel de concentración de la mayoría de los parámetros que caracterizan la calidad del agua deseada, aunque se llegó a la conclusión de que era necesario incorporar otros procesos a los trenes de tratamiento propuestos para remover nitratos, proteico, nitrógeno, grasas y aceites, para que de esta forma se pueda alcanzar en su totalidad el objetivo planteado.

El tipo de tratamiento y sus alternativas dependen fundamentalmente de la calidad inicial del agua disponible para la recarga, ya que como sabemos éstas son de diferente calidad.

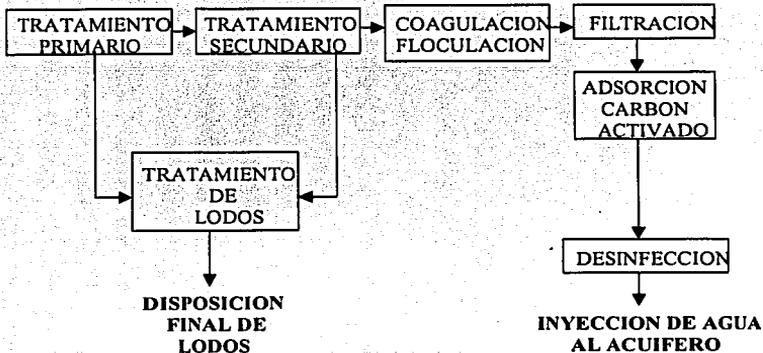
A continuación se proponen dos alternativas de tratamiento para las aguas que transitan por el Gran Canal, ya que es aquí, donde se presenta la calidad de agua más pobre, con lo cual se garantiza que los procesos serán efectivos para los demás tipos de agua.



ALTERNATIVA 1



ALTERNATIVA 2



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



De estos dos diagramas podemos observar que la única diferencia entre los trenes de tratamiento es la sustitución del proceso de ósmosis inversa ( el origen es de tecnología de importación) propuesto en la alternativa 1, por el proceso de Coagulación - Flocculación (que es de tecnología nacional) incluido en el tren de tratamiento de la alternativa 2.

Estos dos trenes han sido seleccionados ya que, son capaces de producir un efluente que cumple no solo con la calidad actual del agua de los acuíferos, sino que además con los niveles de concentración que establece la Norma Oficial Mexicana para agua potable (NOM-127-SSA1-1994, VER ANEXO)

En las tablas 2 y 3 (ANEXOS) podemos observar la calidad del agua que se espera del efluente de cada tren de tratamiento.

De esta de esta forma podemos notar que en el tren de tratamiento de la Alternativa 2 el único parámetro que sobrepasa el valor de la norma es el nitrógeno amoniacal, por lo que desde punto de vista, parecería más aceptable la primera opción, sin embargo, este parámetro no es una dificultad técnica para su reducción, ya que es factible hacerlo sometiendo, por ejemplo, el efluente secundario de lodos activados al proceso de desorción.



## ***CAPITULO VI.***

### ***RECARGA ARTIFICIAL AL ACUÍFERO.***

#### ***VI.1 GENERALIDADES.***

Como se ha mencionado, la recarga artificial del acuífero de la Ciudad de México puede presentar condiciones favorables muy importantes para la disminución de la subsidencia del terreno, para mejor manejo del acuífero, y para almacenamiento de agua para uso futuro, con ello reducir la importación de agua de cuencas externas.

En forma general, para efectuar la recarga artificial es necesario que se cumplan principalmente dos condiciones:

- 1) Existencia de zonas permeables que permitan la infiltración de agua al acuífero, considerando que estos puntos o zonas pueden ser alcanzados por medio de pozos, estanques o galerías filtrantes.  
Como pudimos ver en el capítulo III, los estanques y galerías requieren de una gran superficie de terreno, conviene hacer notar que las condiciones geológicas de la cuenca, impiden la infiltración a través de este método, y que a la vez solo se puede realizar en los flancos de las sierras.  
Por otra parte, el método de recarga a través de pozos, no requieren de gran extensión de terreno, además de que atraviesan la capa de arcillas.

Existencia de volúmenes de agua susceptibles de utilizarse para la recarga.  
Los volúmenes de agua disponibles en la Ciudad de México, corresponden a las aguas residuales renovadas provenientes de plantas de tratamiento distribuidas prácticamente en toda la ciudad, que se deben de someter a un tratamiento adicional para que alcancen la calidad deseable para recarga.



## **VI.2 ZONAS APROPIADAS PARA LA RECARGA.**

Se sabe que las zonas mas apropiadas para la recarga artificial de acuíferos se encuentran en rocas que pueden agruparse de acuerdo a sus características para permitir la infiltración, circulación, y almacenamiento de agua en el subsuelo, dentro de estos grupos de rocas tenemos:

- Basaltos y piroclásticos, Su alta permeabilidad permite la infiltración de agua, tanto a través de pozos como estanques. En pozos es factible recargar alrededor de entre 40 y 60 lps por pozo y por medio de estanques se pueden infiltrar caudales de hasta 1000 lps. Este tipo de material podemos encontrarlo al sur de la zona metropolitana, así como en la Sierra de Santa Catarina.
- Materiales granulares, que se encuentran al pie de la Sierra de las Cruces, presentan una permeabilidad media. Con estos materiales es factible recargar agua al subsuelo en caudales alrededor de 20 lps por pozo.
- Intercalaciones de materiales granulares con volcánicos, encontrados al oriente, en la Sierra Nevada, permiten la infiltración o recarga artificial con caudales variables, del orden de 20 lps por pozo.
- Los materiales granulares dentro de la Ciudad de México, presentan una permeabilidad media; a través de estos es factible efectuar una recarga artificial del orden de 10 a 30 lps por pozo.
- Los materiales granulares que se encuentran hacia el valle de Texcoco, presentan una permeabilidad de media a baja, por lo que solo permiten una recarga del orden de 5 a 10 lps por pozo.



### **VI.3 MÉTODOS DE RECARGA APLICABLES A LA CIUDAD DE MÉXICO.**

En el capítulo III, pudimos conocer en términos generales, que la recarga de un acuífero se puede realizar a través de dos tipos de sistemas principales:

- 1) Superficial
- 2) Profundidad.

Así mismo, en forma general la recarga de un acuífero puede considerarse de dos tipos:

- Recarga inducida.
- Recarga Artificial.

La recarga inducida se refiere a la creación de situaciones favorables a la infiltración natural.

Sus métodos pueden consistir en preparar superficies de tal forma, que favorezca la infiltración. Este tipo de procedimiento es el que es más recomendable para infiltrar el agua de lluvia en las zonas poniente y sur de la Ciudad de México.

La recarga artificial, como hemos podido ver en el capítulo III, consiste en crear dispositivos especialmente diseñados para tal fin.

En forma general se puede decir que la recarga de superficie no es un procedimiento recomendable en las ciudades por la alta densidad de población y por el alto costo de las áreas que son necesarias. Además que, en el caso de la Ciudad de México, gran parte de ella está asentada sobre un grueso estrato de arcilla. Sin embargo es conveniente explorar esta alternativa en sitios como la zona de la Sierra Santa Catarina, zonas de los pedregales y laderas de algunas de las sierras vecinas.

De lo anterior, se concluye que el empleo de pozos para la recarga es el procedimiento más recomendable para el caso de la Ciudad de México.



#### **VI.4 DISPONIBILIDAD DE AGUA PARA RECARGA ARTIFICIAL**

En la recarga artificial de acuíferos, uno de los principales problemas que se enfrenta, es la disponibilidad o fuente de agua, ya que por lo general la demanda supera la oferta.

En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, existen volúmenes de agua disponibles, principalmente de agua residual. La ciudad consume alrededor de  $60 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Actualmente una pequeña parte es tratada y rehusada principalmente en riego de áreas verdes, industrias y llenado de canales de Xochimilco.

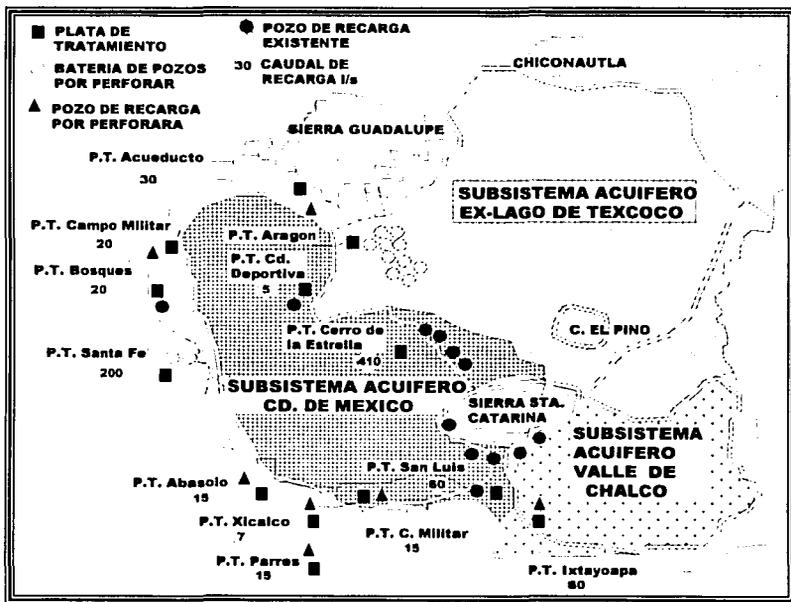
El remanente existente de agua residual tratada se ha programado para recarga artificial, además de volúmenes adicionales provenientes de nuevas plantas y ampliaciones de las actuales.



## VI.5 RECARGA CON AGUA TRATADA.

Actualmente en el D.F. se cuentan con 24 plantas de tratamiento de aguas residuales, de las cuales se seleccionan 13, puesto que se encuentran ubicadas en lugares donde se puede realizar la recarga a través de pozos, las otras 11 se localizan cerca de pozos de abastecimiento de agua potable, por lo cual no se consideran.

Las 13 plantas que se seleccionaron se muestran en la fig. siguiente:



Plantas de tratamiento en el D.F. Propuestas para Recarga a través de pozos

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



La mayor parte del agua tratada se destina al riego de áreas verdes. Una parte de esta agua y la proveniente de futuras ampliaciones o incrementos en eficiencia de operación se podrá destinar para la recarga artificial de acuíferos.

La planta de San Juan de Aragón, tiene una capacidad de operación de 364 lps. Considerando que se pudiera destinar 200 lps. para la recarga, ésta se podría llevar cabo a través de 10 pozos, con un caudal de 20 lps por cada pozo.

Se sugiere que los pozos se ubiquen en una batería a lo largo del límite del D. F., hacia esta zona, los materiales que existen en el subsuelo permiten la recarga artificial, estarían alejados de actuales pozos de extracción y por otra parte, en el sitio propuesto para la batería de pozos el flujo del agua circula de poniente a oriente, es decir, hacia el lago de Texcoco, lo que evitaría un flujo de agua hacia la zona de pozos de la ciudad de México.

En lo que se refiere a la planta de Acueducto de Guadalupe, tiene una capacidad de operación de 57 lps. Y no se encuentran pozos de agua potable cercanos, en dirección al flujo en que circula el agua subterránea. La zona se encuentra sobreyaciendo a materiales permeables que permiten la recarga artificial a través de un pozo perforado dentro de la planta o a sus alrededores.

Se ha estimado factible recargar un caudal de 30 lps.

La planta de tratamiento de Cerro de la Estrella es la que mayor capacidad tiene en gasto de operación dentro del D.F. Su capacidad de operación es de 2300 lps. A nivel terciario, de los cuales se sugiere utilizar 410 lps. Para recargar agua tratada a través de 9 pozos ya existentes, 4 de ellos se ubican al norte de la sierra de Santa Catarina y 5 en la zona sur de dicha Sierra.

En los pozos ubicados al norte de la Sierra de Santa Catarina, la permeabilidad de los materiales permitiría la recarga de 40 lps. por cada pozo (160 lps. totales), y por otra parte, en el sur se podría recargar 50 lps. por cada pozo (250 lps. totales).

Uno de estos pozos, el Santa Catarina 6 ha sido adoptado por la DGOH para recarga y se encuentra operando actualmente. Incluye un tren de tratamiento previo a la inyección.

Además existe una conducción de aguas tratadas, que va de la planta de Cerro de la Estrella hacia el área de Xochimilco, la cual podría ser parcialmente utilizada para este fin.

En Bosques de las Lomas se cuenta con una planta de tratamiento con una capacidad de operación de 27 lps; de los cuales 20 podrían ser recargados al subsuelo a través de un pozo ya existen, que anteriormente se utilizaba para extracción de agua potable pero se encuentra cancelado.



La planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Deportiva tiene un gasto de operación de 80 lps. Desde años anteriores, se encontró la posibilidad de derivar 5 lps. para recarga, lo cual se podría realizar a través del pozo 28, el cual no se encuentra en operación para agua potable. Alrededor de dicho pozo no se encuentran extracciones que pudieran verse afectadas en forma directa.

Las plantas de tratamiento ubicadas en la porción suroeste de la zona metropolitana correspondientes a Abasolo, H. Colegio Militar y Parres, tienen un caudal de operación de 15 lps. Cada una de ellas. Se desconoce la utilización de esta agua. Estos caudales podrían ser recargados al subsuelo en su totalidad, mediante 3 pozos ubicados uno en cada planta.

En la planta de tratamiento de San Miguel Xialco, se tiene una capacidad de operación de 75 lps. de los cuales se estima que se podría recargar 7 lps. a través de un pozo.

En la planta de tratamiento de San Luis Tlaxialtemalco, desde hace varios años se construyó y adoptó el pozo San Luis-15, para que a través de él, se recargue 60 lps. Alrededor del pozo SL-15, existen 3 pozos de monitoreo.

La planta de San Juan Ixtayoapan tiene una capacidad de operación de 106 lps. Aquí es factible inyectar 60 lps. a través de un pozo que se requeriría perforar junto a la planta.

La planta de tratamiento del Campo Militar tiene una capacidad de operación de 30 lps. Se cree factible que podría destinarse 20 lps. de dicha agua para recarga. La inyección se podría realizar a través de un pozo que se perforaría junto a la planta de tratamiento, donde se encuentran materiales permeables.

En la planta de tratamiento Santa Fe, actualmente se tratan 280 lps. a nivel secundario, de los cuales 200 podrían ser recargados al subsuelo a través de una batería de 8 pozos ubicados en las cercanías de la planta, que corresponde a la zona de lomas del poniente.

En resumen, la recarga artificial del acuífero con agua residual tratada, a través de pozos, incluye 7 plantas de tratamiento donde se requiere la perforación de un pozo de recarga en cada una de ellas.

Esta alternativa en conjunto incluye la recarga de 1057 lps. a través de 37 pozos, 12 de los cuales ya se encuentran perforados.

Para la recarga artificial al acuífero con agua residual tratada, como se indicó anteriormente, deberá ser adecuada mediante tratamientos adicionales.



En referencia a la recarga a través de estanques, la DGCHO construyó estanques para la infiltración de aguas tratadas sobre el flanco sur de la sierra de Santa Catarina.

La recarga posible a través de las primeras experiencias de la operación es de 600 lps. y se tiene en proyecto la ampliación a 1000 lps.

Es recomendable, antes de continuar con una recarga masiva de agua a través de estanques, que se realice un monitoreo durante un periodo a fin de evaluar el impacto en el acuífero, y de acuerdo con los resultados, programar la factibilidad de construir estanques de infiltración nuevos.



**RECARGA ARTIFICIAL CON AGUAS RESIDUALES PLAN MAESTRO DE AGUA POTABLE**

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	CAPACIDAD DE OPERACIÓN (lps)	NIVEL DE TRATAMIENTO	CAUDAL (lps)	POZOS	ESTANQUES (lps)	POZOS MAS ESTANQUES (lps)
Acto. De Gpe.	57	Secundario	30	1		
San Juan Aragón	364	Secundario	200	10		
CD. Deportiva	80	Secundario	5	1		
C.de la Estrella	2300	Terciario	410	9	600	
B. de las Lomas	27	Secundario	20	1		
Campo Militar	30	Secundario	20	1		
San. J. Ixtayopan	106	Secundario	60	1		
Abasolo	15	Secundario	15	1		
H. Colegio Militar	15	Secundario	15	1		
Parres	15	Secundario	15	1		
San M. Xicalco	75	Secundario	7	1		
San. L. Tlaxiátemalco	110	Secundario	60	1		
Santa Fe	280	Secundario	200	8		
Total	3876	Secundario	1057	37	600	1657

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## **VI.6 CRITERIO DE DISEÑO PARA EL EMPLEO DE POZOS.**

De acuerdo con la información existente, debido a la posición del nivel freático y a la distribución de las capas permeables e impermeables de cada sitio en particular, se considera que existen dos casos, uno, la de recarga a través de un pozo en un acuífero libre y otro, en uno confinado.

El criterio más importante y adecuado para seleccionar el diseño de pozos, es que, se considera que debe ser capaz de representar el caso de los pozos de recarga en régimen estacionario, donde su penetración no necesariamente es total (pozos parcialmente penetrantes). Esto se debe a que como se ha mencionado, se utilizará agua tratada, ésta se produce en forma continua y por lo tanto es aceptable la hipótesis de flujo estacionario.

Los Pozos de recarga pueden ser parcialmente penetrantes porque la profundidad de la capa impermeable del acuífero principal se encuentra a grandes profundidades, en tanto el nivel freático varía entre los primeros 30 metros.

## **VI.7 CRITERIO DE DISEÑO PARA EMPLEO DE ESTANQUES DE INFILTRACIÓN.**

Dada la simplicidad del procedimiento de recarga al acuífero al emplear estanques de infiltración, el principal problema consiste en verificar que la capacidad de infiltración de los estratos de suelo sea congruente con las expectativas de recarga. Es decir, que aunque la velocidad superficial sea adecuada, no deben existir estratos impermeables que limiten la recarga esperada en el acuífero que se desea recargar.

Es evidente que este tipo de recarga deberá hacerse en zonas de alta permeabilidad que no tengan influencia del acuitardo.



## **CAPITULO VII.**

### **ESTUDIO TIPO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA LA RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUIFERO**

#### **VII.1 EL ACUIFERO DEL VALLE DE MEXICO**

A lo largo del presente trabajo, hemos podido conocer que el sistema acuífero está dividido en tres subsistemas:

*SUBSISTEMA ACUIFERO DE LA CIUDAD DE MEXICO*

*SUBSISTEMA ACUIFERO DE TEXCOCO*

*SUBSISTEMA ACUIFERO DE CHALCO*

La división del Sistema Acuífero en subsistemas corresponde a la realizada en años anteriores, en la que el criterio aplicado para la división, es la dirección del flujo subterráneo. El parteaguas que limita el acuífero de la Ciudad de México con el de Texcoco va desde la sierra de Santa Catarina con dirección al Noroeste, pasando por el Aeropuerto internacional y posteriormente sigue rumbo al Norte por la elevación topográfica de la sierra de Guadalupe.

En el capítulo anterior conocimos que debido a la gran superficie de terreno necesaria para realizar la recarga del acuífero por medio de infiltración y dado que en el valle de México los espacios son reducidos, es más práctico recargar el acuífero por inyección, para tal fin, se han considerado tres zonas posibles para recargar, según estudios realizados por la DGCOH. A estas zonas se les ha denominado como:

*AEROPUERTO*

*SANTA CATARINA*

*ESTADIO AZTECA*

Los valores promedio de la calidad del agua subterránea en estas tres zonas, se muestra en la tabla 1 (ver ANEXOS), como puede apreciarse, el agua subterránea de mejor calidad es la del Estadio Azteca con una alta calidad un poco inferior quedan las zonas del Aeropuerto y Santa Catarina.



Dado que para la recarga del acuífero se propone usar aguas residuales, éstas deben recibir un tratamiento lo suficientemente avanzado como para garantizar la misma calidad del agua en ambos, es decir, que la calidad del agua para la recarga por inyección o infiltración no debe ser menor a la del acuífero (ver capítulo VI) donde se realice la recarga.

Actualmente, en el ámbito internacional no existe una normatividad que especifique la calidad del agua utilizada para la recarga artificial de acuíferos, sin embargo cada país de acuerdo a su experiencia, fija sus propios criterios.

En la tabla 4 (ver ANEXOS) se presentan grados de depuración que deben alcanzar las aguas residuales tratadas para el Distrito Federal, en función directa del destino final del efluente de una planta de tratamiento.

Por otro lado, en la siguiente tabla se mencionan los diferentes niveles de tratamiento que se pueden aplicar al agua residual, en función al rehuso que se les dé a los mismos.

Estos niveles de tratamiento pueden ser: secundario, terciario, avanzado o de potabilización; y los rehusos, son entre otros, para riego de áreas verdes, zona industrial y recarga del acuífero.

REHUSO O APLICACIÓN	NIVEL DE TRATAMIENTO			
	SECUND	TERCIARIO	AVANZADO	REPOTAB
Consumo Humano			X	X
Recarga Acuíferos Inyección			X	X
Recarga Acuíferos Infiltración			X	X
Riego Áreas Verdes Residencial		X	X	X
Jardines	X	X	X	X
Deportivos		X	X	X
Camellones	X	X	X	X
Panteones		X	X	X
Lagos (Áreas Expuestas)		X	X	X
Agrícola - Productos Crudos		X	X	X
Agrícola - Productos Cocidos		X	X	X
Recreativos - Sin Contacto		X	X	X
Recreativos - Con Contacto		X	X	X
Forrajes y Pasturas		X	X	X
Abrevaderos y Vida Silvestre		X	X	X
Canales (Área Expuesta)		X	X	X
Área Industrial		X	X	X

**NIVEL DE TRATAMIENTO REQUERIDO EN FUNCIÓN DEL REHUSO**

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



## VII.2 INFRAESTRUCTURA PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL.

Por otra parte, es importante en un estudio de tratamiento de aguas residuales para recarga de acuíferos, conocer la infraestructura con la que se cuenta, así como niveles de tratamiento que ofrecen.

### PLANTAS DE TRATAMIENTO EN EL D.F.

DELEGACIÓN	PLANTAS DE TRATAMIENTO	CAPACIDAD (l/s)			NIVEL DE TRATAMIENTO	
		INSTALADA	OPERACIÓN	POT. DE INCREM.	ACTUAL	PROSP.
AZCAPOTZAL.	EL ROSARIO	25	16	4	AVANZA	
A. OBREGÓN	STA FE	280	0	280	SECUND.	AVANZA
B. JUAREZ	NO EXISTE					
COYOACAN	CD. UNIVERS. COYOACAN	60 800	30 336	20 164	TERCIAR SECUND.	
CUAUHTEM.	TLALTELOLCO	22	14	4	SECUND.	
CUAJIMALPA	NO EXISTE					
IZTACALCO	CD. DEPORT. IZTACALCO	230 15	60 10	140 2	SECUND. AVANZA	
IZTAPALAPA	C. ESTRELLA	4000	2300	900	TERCIAR	
G. A. MADERO	ACTO. GPE. SN J. ARAGÓN	100 500	57 364	143 376	SECUND. SECUND.	TERCIAR.
M.CONTRER.	NO EXISTE					
MILPA ALTA	( F.O.)	7	7	0	SECUND.	
M. HIDALGO	B. LOMAS CHAPULTEPEC C. MILITAR I	55 160 30	27 106 16	18 109 74	SECUND. SECUND. SECUND.	TERCIAR.
TLAHUAC	S.J. IZTAYOPAN SN. NICOLAS T.	15 15	15 15	15 15	SECUND. SECUND.	

ESTA TESIS NO SALE  
 FALTA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALE  
 DE LA BIBLIOTECA



**PLANTAS DE TRATAMIENTO EN EL D.F. (Continuación)**

DELEGACIÓN	PLANTAS DE TRATAMIENTO	CAPACIDAD (l/s)			NIVEL DE TRATAMIENTO	
		INSTALADA	OPERACIÓN	POT. DE INCREM.	ACTUAL	PROSP.
TLALPAN	ABASOLO	30	15	15	SECUND.	
	C. MILITAR	18	12	6	SECUND.	
	PARRES	75	75	75	SECUND.	
	PEMEX P.	25	6	19	SECUND.	
	SN M. XICALCO	75	75	75	SECUND.	
	TOPILEJO (F.O.)	7	0	7	SECUND.	
V. CARRANZA	NO EXISTE					
XOCHIMILCO	TLAXIALTEM.	150	110	115	TERCIAR	
	RECLUSORIO S.	26	13	12	SECUND.	

SECUND. = TRATAMIENTO SECUNDARIO

TERCIAR. = TRATAMIENTO TERCIARIO

AVANZA. = TRATAMIENTO AVANZADO

F.O. = FUERA DE OPERACIÓN

Actualmente, la infraestructura de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de México y su zona metropolitana cuenta con 24 plantas de tratamiento, de las cuales, 14 son operadas por la DGCOS, 2 están fuera de servicio, 4 concesionadas, 1 operada por la UNAM, 2 operadas por la SEDENA y adicionalmente, la DGCOS está construyendo la planta de tratamiento de tratamiento de Santa Fe, con la cual se completa el total señalado.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### ***VII.3 ANALISIS DE LAS ALTERNATIVAS DE UN PROCESO DE TRATAMIENTO.***

#### ***VII.3.1 DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD DEL AGUA DEL ACUIFERO.***

La información sobre la calidad del agua del sistema de acuíferos de la zona metropolitana de la ciudad de México, es muy escasa en nuestro país, los sitios donde actualmente se lleva a cabo recarga artificial al acuífero, ya sea por infiltración o por inyección, tienen procesos de tratamiento en los cuales el agua tratada debe alcanzar al menos niveles similares a los del agua presente en los acuíferos de esas zonas. Tal es el caso de la zona de Santa Catarina en donde se realiza recarga artificial mediante infiltración y a través de lagunas, y en la zona de San Luis Tlaxialtemalco donde se recarga por medio de pozos de inyección.

En estudios desarrollados con anterioridad por la DGCOH, se toma como criterio que la calidad del agua para recarga artificial no debe ser menor a la del acuífero donde se realice la recarga. Además se elaboró la tabla I (ver ANEXOS), en la cual se muestran los valores promedio de la calidad del agua subterránea en pozos de las zonas denominadas como Aeropuerto, Santa Catarina y Estadio Azteca. Sitios que de acuerdo al estudio de referencia se consideran adecuados para recargar. En dicha tabla, puede apreciarse que el agua subterránea de mejor calidad es la del Estadio Azteca, luego la del Aeropuerto y de Santa Catarina.

La calidad del agua en el acuífero de la Cuenca de México varía; algunas de estas variaciones se deben a las características de las formaciones geológicas de la región. El agua de las arcillas superficiales es de muy baja calidad, debido a su alta concentración de sales disueltas (de 1,000 a 130,000 miligramos por litro, Rodríguez, 1987). Por esta razón, los pozos de producción que abastecen agua potable suelen tomarla a una profundidad de más de 400 metros, con la finalidad de captar el agua de mayor calidad del acuífero principal; sin embargo, se han documentado algunas intrusiones de aguas salinas en el acuífero principal. Las sales y los sólidos totales disueltos en los pozos de producción aumentan generalmente al pie de las montañas y hacia el centro de la planicie, tal y como en los antiguos lagos había sitios donde la salinidad era mayor. Elevadas concentraciones de sulfuro, hierro y manganeso, provenientes de las formaciones geológicas volcánicas de la región, han sido detectadas en áreas específicas (Bellia, 1992). Aunque esto no representa un serio problema, se han cerrado pozos en algunos lugares donde las concentraciones químicas inorgánicas son más altas que las marcadas por las normas de calidad del agua.



El Laboratorio Central de Control del Distrito Federal en Xotepingo ha elaborado mapas identificando parámetros adicionales de agua subterránea que indican el potencial de contaminación orgánica y/o biológica. Por ejemplo, en 1993 pruebas realizadas en pozos revelaron áreas en las que el agua no cumplía con los requisitos establecidos de color, sólidos totales, amoníaco, nitrógeno orgánico, nitratos, carbón orgánico y dureza. Estos problemas tienden a localizarse en la sección este del Distrito Federal, así como en algunas porciones de los campos de pozos que lo rodean.

Durante el mismo periodo, el agua en bloque de los pozos no cumplía con las normas fisico-químicas fijadas ( en el 30 por ciento de los casos) ni con las normas bacteriológicas establecidas ( 20 por ciento). En algunos de los sitios donde se detectaron problemas de calidad del agua, se lleva a cabo un tratamiento adicional a pie de pozo que incluye oxidación, filtración y adsorción con carbón activado como parte de un programa piloto; los pozos que no cumplen con las normas han sido cerrados.

El Estado de México reporta que el 23 por ciento de los 242 pozos de abastecimiento de agua que surten a su área de servicio no cumplen con las normas establecidas para bacterias coliformes, mientras el 11 por ciento no lo hace con las normas relativas a constituyentes inorgánicos. En 21 pozos se ha reportado un aumento en la concentración de sulfuro de hidrógeno, aunque debe aclararse que no existe una norma para detectar su presencia.

La información sobre la calidad del agua proporcionada por la DGCOH-GDF y la Comisión Nacional del Agua (CNA), indica que las fuentes principales de agua superficial de la ZMCM el río Cutzamala, el río Magdalena y la presa Madin tienen una calidad aceptable en lo general, con excepción de los altos niveles de coliforme fecal en el río Cutzamala (Comisión Nacional de Investigación, 1994). Estas fuentes de agua superficial reciben tratamientos por coagulación química, filtración y cloración. El agua subterránea es tratada, por lo general, con cloración, por lo que toda el agua está por lo menos desinfectada. El agua superficial de muchos manantiales pequeños contribuye en 0.7 m<sup>3</sup>/s al abastecimiento de agua de la ZMVM. Pruebas reportadas por la DGCOH-GDF en 1993 indicaban que una alta proporción de manantiales no cumple con las normas fisico-químicas (38%) ni bacteriológicas (76%). No se encontró información disponible respecto a la aplicación de un tratamiento distinto a la desinfección en estas fuentes superficiales.



### ***VII.3.2 DETERMINACIÓN DEL TIPO DE RECARGA AL ACUÍFERO.***

Como hemos podido conocer, la recarga artificial se define como, el conjunto de técnicas cuyo objetivo principal es permitir una mejor explotación de los acuíferos, por aumento de sus recursos y creación de reservas, mediante una intervención directa o indirecta en el ciclo natural del agua.

Por otra parte, sabemos que los métodos de recarga son tan variados, como la procedencia del agua, y su mayor o menor éxito, depende de una buena adaptación del terreno, subsuelo, tipo de agua necesidades y condiciones socioeconómicas, de la zona que se planea realizar la recarga artificial.

### ***VII.3.3 DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS DE UN PROCESO DE TRATAMIENTO AVANZADO.***

De acuerdo a la normalización establecida para el tratamiento de aguas residuales y conforme al rehuso que se le dará a las mismas, se tiene que cumplir un grado de tratamiento que lleve a garantizar los requerimientos permitidos en los diferentes parámetros de la calidad del agua residual sometida a un proceso para mejorar su calidad. (ver tabla 4 de ANEXOS).

Aunque normalmente todas las aguas naturales contienen cantidades variables de otras sustancias (sales, carbonatos, cloruros, etc.) en concentraciones que fluctúan de algunos cuantos miligramos por litro (0.06-8), en agua de lluvia, hasta miles de miligramos por litro (34,500), como en el caso del agua de mar, por lo general, son aguas residuales las que contienen la mayoría de los constituyentes del agua potable suministrada, mas las impurezas adicionales (materia orgánica, nitrógeno, fósforo, metales pesados, sales minerales, etc.) provenientes del proceso productor de desechos.

Para determinar y definir las condiciones del agua residual, se requiere tomar muestras de la misma, cuantificando los diferentes elementos contenidos, mediante un análisis que determine sus características físicas, químicas y biológicas.

El medir simplemente el contenido total de sólidos de una muestra es insuficiente, a continuación se describe las condiciones generales que deben conocerse para especificar las características de una muestra.



### ***Características Físicas:***

Son relativamente fáciles de medir, las principales son: Temperatura, Sabor, Olor, Color, Turbidez, contenido de Sólidos, Conductividad eléctrica, etc.

### ***Características Químicas:***

Tienden a ser más específicas en su naturaleza y por eso son más útiles para evaluar las propiedades de una muestra de inmediato. Dentro de estas se tienen: Potencial de Hidrógeno (pH), Alcalinidad, Acidez, Dureza, Oxígeno Disuelto, Nitrógeno, Cloruros, y Metales Disueltos.

### ***Características Biológicas:***

El análisis bacteriológico de los abastecimientos de agua, es el parámetro más sensible. Por lo general, todos los desechos orgánicos especialmente los de origen doméstico, contienen grandes cantidades de microorganismos, al igual que muchas aguas superficiales naturales.

El grado de tratamiento requerido para una agua residual depende fundamentalmente de los límites de vertido para el efluente o del rehuso específico al que se desee destinarla.

La selección de los procesos y operaciones unitarias se designan convencionalmente como sigue:

#### ***Tratamiento Primario:***

Cribado, Desarenado, y Sedimentación Primaria.

#### ***Tratamiento Secundario:***

Cribado, Desarenado, Sedimentación Primaria, Tratamiento Biológico, Sedimentación Secundaria y Desinfección.

#### ***Tratamiento Terciario:***

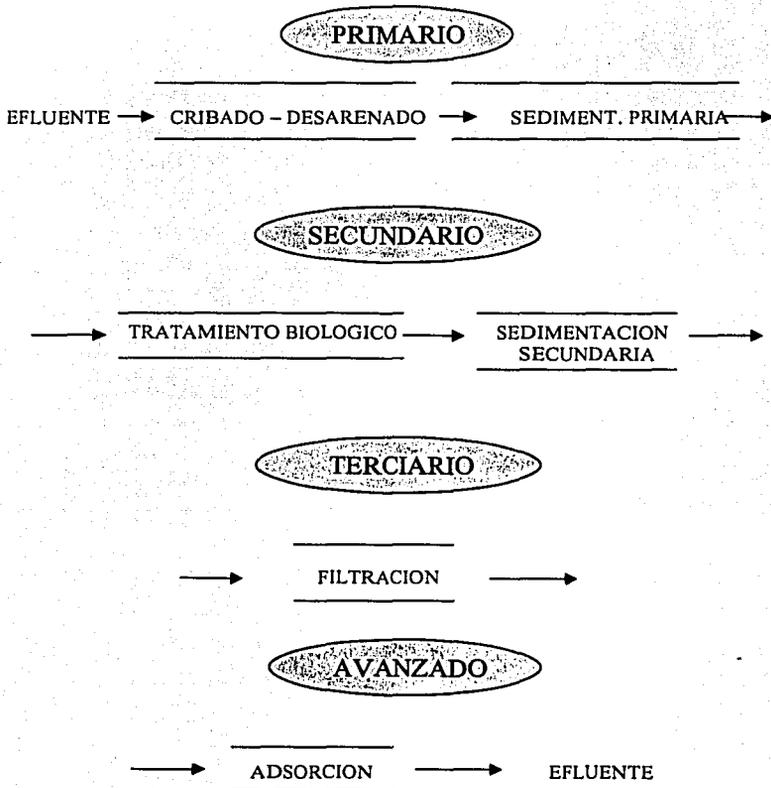
Cribado, Desarenado, Sedimentación Primaria, Tratamiento Biológico, Sedimentación Secundaria, Filtración y Desinfección.

#### ***Tratamiento Avanzado:***

Cribado, Desarenado, Sedimentación Primaria, Tratamiento Biológico, Sedimentación Secundaria, Filtración, Adsorción (intercambio iónico, osmosis inversa, etc.) y Desinfección.



En la siguiente figura se muestra el esquema de definición convencional de los diferentes tipos de tratamiento.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Por lo que respecta a la recarga del acuífero, el proceso que se le tiene que dar a las aguas residuales, es el avanzado, pudiendo ser a partir de remoción de amoniaco, adsorción de carbón activado granular, filtración de membranas semipermeables, etc.

En la mayoría de los procesos de tratamiento primarios, así como secundarios, se producen lodos, de los que hay que deshacerse en forma adecuada. Los lodos que resultan únicamente de los procesos de separación sólido - líquido se conocen como lodos primarios, y los provenientes de procesos biológicos se designan lodos secundarios. Los primarios consisten en partículas sólidas, básicamente de naturaleza orgánica. Los secundarios son fundamentalmente biomasa en exceso producida en los procesos biológicos.

Por otra parte, antes de aplicar el tratamiento avanzado a las aguas residuales crudas, se requiere darles una serie de procesos unitarios preliminares, primarios, secundarios y hasta terciarios, los cuales al igual que los avanzados.

A continuación se describe brevemente los procesos de tratamiento:

*(Para fines prácticos el presente trabajo se enfoca a la definición de los procesos para el tratamiento en línea de agua, no así para consulta de línea de fangos o tratamiento de lodos, consultar otra referencia.)*

### **VII.3.3.1 CRIBADO**

La operación de cribado se emplea para remover el material grueso, generalmente flotante, contenido en algunas aguas residuales crudas, que pueden obstruir o dañar bombas, tuberías y equipos de las plantas de tratamiento o interferir con la buena operación de los procesos de tratamiento. El cribado puede ser fino, por medio de mallas de alambre, o grueso, por medio de rejillas.

#### **VII.3.3.1.1 REJILLAS**

Las rejillas consisten en barras metálicas, verticales o inclinadas, espaciadas de 16 a 76 mm. y colocadas en los canales de acceso a las plantas, antes de las estaciones de bombeo. Los sistemas de limpieza de las rejillas pueden ser manuales o automáticos. Las barras pueden ser rectangulares o cuadradas con uno o ambos extremos redondeados.



### VII.3.3.1.2 MALLAS

Las mallas pueden colocarse en marcos fijos o tambores rotatorios. El agua fluye a través de la malla y los sólidos son retenidos en ella. Las mallas pueden ser de acero inoxidable, plástico o fibra de vidrio reforzada. Las mallas son frecuentemente utilizadas después de las rejillas, para disminuir la carga contaminante a los procesos subsecuentes de tratamiento, la eficacia de remoción de contaminantes varía de 5 a 20 % para DBO y de 5 a 25 % para sólidos suspendidos. En el caso de mallas en marcos fijos, el agua descendiendo por gravedad sobre la superficie de una malla inclinada, frecuentemente con pendiente variable, el agua pasa a través de la malla y los sólidos se recogen en la parte inferior del marco.

### VII.3.3.2 DESARENACIÓN

La desarenación es una operación unitaria que se emplea para remover las gravillas, arenas, cenizas y otros materiales inorgánicos presentes en las aguas residuales municipales que pueden causar abrasión o desgaste excesivo en los equipos mecánicos de una planta de tratamiento. La desarenación se ubica generalmente después del cribado y antes de la sedimentación primaria.

Con ésta operación se busca remover el 100 % de las partículas inorgánicas de un tamaño igual o mayor a 0.21 mm. y dejar en suspensión el material orgánico. Para lograr ésta remoción es necesario conservar la velocidad del agua, entre 25 y 38 cm/seg. La sedimentación gravitacional de las partículas es del tipo discreto, es decir, cada partícula se sedimenta independientemente sin presentarse fenómenos de floculación de partículas. La eficiencia de remoción de partículas de tamaño inferior al tamaño de diseño es directamente proporcional a la relación de su velocidad de sedimentación con la velocidad de sedimentación de diseño.

Las cámaras de desarenación pueden ser de flujo horizontal con disposición simple por gravedad de las partículas en el fondo del canal o pueden ser aereadas con flujo en espiral. En ambos casos, para la concentración de las arenas sedimentadas se recomienda el empleo de rastras mecánicas. Los desarenadores aereados producen un sedimento más limpio y fácil de manejar que los desarenadores de flujo horizontal. Otra ventaja de los desarenadores aereados es que regulando la dosis de aire alimentado se pueden ajustar las condiciones de operación de la unidad en función de la proporción de sólidos inorgánicos y orgánicos que contenga el agua residual.



### **VII.3.3.3 REMOSIÓN DE GRASAS Y ACEITES.**

La remoción de grasas y aceites se puede llevar a cabo en tanques desnatadores o tanques de preaeración.

#### **VII.3.3.3.1 TANQUES DESNATADORES.**

Un tanque desnatador es una unidad construida de tal manera que el material flotante se remueve, y el agua fluye constantemente hacia fuera de la unidad por debajo de una cortina. Esto se puede lograr en un tanque individual o como combinación del sistema del sistema de sedimentación primaria, dependiendo del proceso y naturaleza del agua residual.

La mayoría de los tanques desnatadores son de forma rectangular y tienen un tiempo de retención de 1 a 15 min. La salida del agua residual, la cual se encuentra sumergida, se localiza en el lado opuesto del influente a una elevación menor para mejorar la flotación de las grasas y aceites y/o sustancias flotantes. El uso de tanques con dos compartimentos en serie mejora la eficiencia de remoción de grasas y aceites.

#### **VII.3.3.3.2 PREAERACIÓN.**

Los objetivos de la aereación antes de la sedimentación primaria son:

- Mejorar la tratabilidad
- Separar las grasas y aceites
- Controlar los olores
- Remover las arenas y mejorar la floculación
- Promover una distribución uniforme de los sólidos flotantes y suspendidos en las unidades de tratamiento
- Incrementar la remoción de DBO.

Periodos cortos de preaeración de 3 a 5 min. , no mejoran materialmente la remoción de DBO o de grasas y aceites.



#### **VII.3.3.4 HOMOGENIZACIÓN**

Los flujos de agua a una planta de tratamiento están sujetos a fluctuaciones temporales, tanto en cantidad como en calidad. La mayoría de las plantas de tratamiento son muy sensibles a este tipo de fluctuaciones. Un tanque de homogenización tiene como objeto balancear los extremos referentes a las fluctuaciones de calidad, en tanto que las variaciones de flujo requieren de una unidad de regulación; ambas unidades permiten un tiempo de contacto normal en la planta de tratamiento. Los tanques de homogenización se diseñan como tanques en línea de las unidades de tratamiento, o como tanques al lado de la línea de tratamiento. En el primer caso, el tanque recibe el agua residual directamente del sistema de colección, y la descarga del tanque a la planta de tratamiento se mantiene esencialmente la misma, es decir, es flujo constante; en el segundo caso, el volumen en exceso al flujo medio es enviado al tanque de homogenización y, cuando el caudal del influente es menor al flujo al flujo medio, el tanque de homogenización descarga la cantidad necesaria para mantener el flujo medio constante. Los tanques se dimensionan para recibir los flujos pico y descarga a flujo constante. Normalmente se requiere de aireación en los tanques de homogenización, esto con el fin de mantener homogénea el agua residual y las condiciones aeróbicas.

#### **VII.3.3.5 SEDIMENTACIÓN PRIMARIA.**

La sedimentación es una operación que se emplea para remover las partículas en suspensión más pesadas que el agua. Esta operación es la más ampliamente usada en el tratamiento de aguas residuales.

La sedimentación primaria se utiliza para la remoción de sólidos sedimentables, ya sean orgánicos o inorgánicos, que están presentes en las aguas. Generalmente, se emplea antes de los procesos biológicos de tratamiento, para disminuir la carga de contaminantes a los procesos subsiguientes.

#### **VII.3.3.6 LODOS ACTIVADOS.**

El proceso de lodos activados tiene como objeto la remoción de materia orgánica, en términos de DBO de las aguas residuales, la remoción de DBO se logra por la conversión biológica en presencia del oxígeno molecular, por microorganismos, de la DBO en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  y en nuevas células de microorganismos. Los microorganismos formados se separan por sedimentación gravimétrica, una parte son recirculados como siembra para la continuación del proceso y el resto se remueven. La combinación de microorganismos y agua residual se conoce como lodos activados. Los lodos en el reactor biológico están sujetos a un proceso de autooxidación, conocido como respiración endógena, proceso que también consume oxígeno.

El oxígeno requerido para el funcionamiento del proceso se suministra por medio de aeradores mecánicos o por medio de difusores. Los aeradores mecánicos pueden ser con turbina sumergida de alta o de baja velocidad.



### VII.3.3.7 AEREACIÓN

El Proceso de aereación extendida es una variante del proceso convencional de lodos activados, el cual, consiste en empleo de:

- Altos tiempos de retención hidráulica
- Altas concentraciones de lodos activados en el reactor
- Altos valores de la edad de los lodos
- Bajas relaciones de Alimento/microorganismos

Bajo estas condiciones, el proceso biológico opera en la fase de respiración endógena con mineralización, casi completa, de los lodos biológicos. Debido al alto tiempo de retención hidráulico empleado y alta concentración de lodos en el reactor, el proceso soporta fácilmente fluctuaciones tanto en la carga hidráulica como en la carga orgánica.

La aplicación de este proceso se limita generalmente, a plantas pequeñas, pues en plantas grandes sus costos iniciales y sus altos costos de operación no le permiten competir favorablemente con otras alternativas de tratamientos biológicos.

El proceso de aereación extendida puede tener lugar en un reactor totalmente mezclado, pero, con el fin de aprovechar mejor la energía requerida en el suministro de oxígeno, es frecuente el empleo de variantes de aereación por pasos o de la variante conocida como estabilización por contacto.

En la aereación por pasos, se busca establecer un régimen hidráulico de flujo pistón, en el reactor y la alimentación de oxígeno en cada sección del tanque es proporcional a la demanda de oxígeno específica para cada sección.

En el proceso de estabilización por contacto, el agua cruda es aereada por un corto periodo por lo general, es menos de una hora, con una alta concentración de lodos activos y de ahí se pasan a la separación gravimétrica, de esta manera se logra eliminar parte de la DBO por adsorción en el lodo activo, reduciendo la demanda de oxígeno del sistema; este proceso se emplea generalmente, cuando una fracción importante de la DBO se encuentra en forma suspendida.

La demanda de oxígeno en el proceso de aereación extendida es considerablemente mayor que en el proceso convencional de lodos activados. La magnitud de la demanda es el resultado de la suma de demanda de oxígeno para la bioxidación de la DBO carbonácea, mas la demanda de oxígeno para el proceso de nitrificación. El proceso de nitrificación, reduce la alcalinidad del agua.

La generación de lodos es menor que en el proceso convencional de lodos activados, con la ventaja adicional de que los lodos producidos están casi totalmente digeridos y son relativamente fáciles de desaguar.



### VII.3.3.8 SEDIMENTACIÓN SECUNDARIA.

La sedimentación es una operación que se emplea para remover las partículas en suspensión mas pesadas que el agua. Esta operación es la mas ampliamente usada en el tratamiento de aguas residuales.

**Tanques Circulares.** Existen dos tipos de tanques circulares en la sedimentación secundaria:

- a) *Tanque circular alimentado por el centro.*
- b) *Tanque circular alimentado por la periferia.*

Ambos tanques utilizan un mecanismo para transportar y remover del tanque los lodos sedimentados. Los lodos últimos son acumulados por el mecanismo en una tolva, al centro del tanque, para ser fácilmente removidos del mismo. El efluente se extrae a través de vertedores triangulares, localizados cerca del centro o del perímetro del tanque, según sea el tipo de sedimentador.

El uso más común de la sedimentación secundaria es para separar los sólidos de los lodos activados que se encuentran en la mezcla, para producir sólidos concentrados como flujo de retorno requerido para mantener el tratamiento biológico y para permitir la sedimentación de sólidos producidos en el sistema de filtros percoladores de baja tasa.

**Tanques Rectangulares.** El diseño de sedimentadores secundarios es similar al de sedimentadores primarios, con la excepción de que en el diseño de sedimentadores para lodos activados se deben considerar grandes volúmenes de sólidos en el licor mezclado. Aún más, el licor mezclado, tiene la tendencia de fluir a la entrada del tanque como una corriente densa e interferir la separación de sólidos y el espesamiento de los lodos. Para manejar exitosamente estas características, se debe considerar los siguientes factores:

- 1) *Tipo de tanque deseado*
- 2) *Carga hidráulica superficial*
- 3) *Carga de sólidos*
- 4) *Velocidades de flujo*
- 5) *Localización de vertedores*
- 6) *Recolección de material flotante*



### VII.3.3.9 COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN

La Coagulación y la floculación químicas, especialmente con el empleo de cal, han demostrado ser métodos muy eficaces tanto en la remoción de bacterias patógenas como virus de las aguas residuales domésticas. Los patógenos adheridos al floculo químico son removidos mediante sedimentación; y en el caso de tratamiento con cal, son inactivados como resultado del elevado pH ( $>11$ ) alcanzado por este proceso.

### VII.3.3.10 FILTRACIÓN

La filtración es el proceso clave para la producción de un efluente de calidad inmediata superior a la de un efluente secundario convencional. Este sistema combina procesos físicos y químicos para la remoción de sólidos de las aguas residuales.

La filtración se ha usado tanto como último pasa de tratamiento, seguido de desinfección y disposición o rehuso, como uno de los pasos que pueden integrar un sistema de tratamiento terciario.

Este proceso se realiza con efluentes que han recibido tratamiento biológico o fisico-químico, el cual es percolado a través de un lecho de medio filtrante granular, en el que los sólidos son retenidos hasta que dicho lecho se obstruye, a tal grado que es necesario provocar un flujo invertido (retrolavado) para limpiar y desfogar los sólidos acumulados durante la operación normal del filtro.

Las unidades de filtración pueden ser operadas por gravedad o por presión, dependiendo su elección de la relación que guarda el proceso de filtración con otros procesos de tratamiento en la planta, del efecto que produce el reciclado de aguas de retrolavado en el sistema en su conjunto y del espacio disponible para su implementación.

Las unidades de filtración requieren de atención cuidadosa y un mantenimiento rutinario frecuente, en algunos casos, es posible automatizar todo el sistema operativo. Aunque la operación de retrolavado se lleve a cabo mediante programas preestablecidos, la calidad del efluente de las unidades debe ser constantemente monitoreadas con el objeto de detectar oportunamente cualquier variación de importancia en el funcionamiento del sistema de filtración. El retrolavado debe ser realizado con extremo cuidado para prevenir pérdidas del medio filtrante. Los dos factores determinantes que afectan la buena operación del sistema y la obtención de un efluente de alta calidad son la operación del proceso aguas arriba y las concentraciones de sólidos aplicadas a los filtros.



### VII.3.3.11 OZONACIÓN

El ozono ( $O_3$ ) Puede ser usado como desinfectante del agua residual, después de que ésta se haya sometido a tratamiento. Como desinfectante (con dosis, comúnmente de 3 a 10 mg/l), el ozono es un agente efectivo en la desactivación de bacterias, esporas bacterianas y microorganismos vegetativos encontrados en las aguas residuales. Adicionalmente, el ozono actúa para oxidar químicamente materiales encontrados en el agua residual, pudiendo reducir la DBO y DQO.

El tratamiento con ozono reduce el color y olor del agua residual. El ozono es inestable y se descompone a oxígeno elemental en un periodo de tiempo relativamente corto (su vida media es de aproximadamente 20 minutos). Consecuentemente, no puede ser almacenado y debe ser producido en el sitio de aplicación usando aire u oxígeno como materia prima. La tasa de generación de ozono se encuentra influenciada por el uso común de aparatos automáticos para el control del voltaje, frecuencia, flujo de gas y humedad. La inyección del ozono al flujo del agua residual puede ser llevada a cabo mediante el uso de aparatos de mezcla mecánicos, columnas de flujo a corriente, difusores porosos o inyectores jet. Por su rápida acción se requiere de periodos de contacto relativamente cortos.

La operación del proceso de ozonación es más flexible que la del proceso de cloración, ya que, para el segundo la producción y dosificación son difíciles de ajustar a variaciones importantes en el caudal y calidad del efluente. Mientras que el ozono es generado en el sitio de aplicación y empleado solamente en bajas concentraciones, es significativamente menos peligroso que el cloro en forma de gas. Por otro lado, el ozono tiene un olor penetrante y distintivo que lo hace detectable en concentraciones que aún no resultan tóxicas para el ser humano.

### VII.3.3.12 CLORACIÓN

El cloro es el oxidante más económico que puede emplearse en la desinfección de aguas residuales tratadas, además de tener la ventaja de proporcionar un residual mediable al ser aplicada en cantidades suficientes.

La efectividad del cloro como desinfectante depende de numerosos factores, incluyendo temperatura, pH, y turbiedad de las aguas residuales; la presencia de sustancias inhibitorias; la concentración de cloro disponible; y el grado de mezcla alcanzado entre el agua y cloro.



En general, las unidades para cloración se diseñan para proporcionar tiempos de contacto de 15 a 30 minutos, con el objeto de permitir una reacción adecuada entre el cloro y las bacterias presentes en el agua residual. Las dosificaciones más típicas son las siguientes:

PROCESO DE TRATAMIENTO	DOSIFICACIÓN (mg/l)
Sedimentación Primaria	5-20
Precipitación Química	2-6
Filtros Percoladores	3-15
Lodos Activados (LA)	2-8
LA + Filtración	1-5

Dentro de los procesos unitarios para garantizar un efluente a nivel avanzado se encuentran los siguientes:

### VII.3.3.13 ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO

La adsorción con carbón activado es empleada con el propósito de remover materia orgánica soluble que permanece en el efluente después de pasar por otros procesos previos de tratamiento; la materia orgánica es adsorbida en los poros de las partículas de carbón y cuando se haya terminada la capacidad de adsorción del carbón, éste puede ser regenerado o reactivado mediante calentamiento, lo que produce que los orgánicos adsorbidos sean retirados de los poros, permitiendo reusar de nuevo el carbón regenerado.

Este proceso se emplea comúnmente después del sistema de filtración, algunas veces después de la cloración a punto de quiebra y en sistemas terciarios de tratamiento.

Una de las principales formas de medir la efectividad del proceso de adsorción por carbón activado es mediante la medición de la DQO del efluente de dicho proceso. La eficiencia de remoción de metales pesados por este medio es muy variable, dependiendo del metal de que se trate, variando desde 73% para el hierro, hasta remociones significativas para mercurio, selenio, y arsénico.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



#### **VII.3.3.14 REMOCIÓN DE AMONIACO**

La remoción de amoniaco gaseoso se realiza mediante la agitación de la mezcla agua-gas en presencia de aire, a altos valores de pH ( $\text{pH} > 10.5$ ). La conversión del "ion" amoniaco a gas se consigue prácticamente al 100% a un pH de 11 unidades. Por estas razones, la separación del gas amoniaco es adecuada cuando las aguas residuales se han sometido a tratamiento con cal, ya que con este proceso se eleva el pH a valores adecuados para llevar a cabo la separación del gas.

Las eficiencias obtenidas en la remoción de  $\text{N-NH}_3$  mediante el empleo de torres de separación varía desde 37% hasta un 98%, para diferentes valores de pH. Como es sabido a mayor valor de pH, la remoción de  $\text{N-NH}_3$  es significativamente mayor, obteniéndose un máximo a valores mayores de 9 (se obtiene un 98% de remoción), no obstante, de que se presenta una disminución de la temperatura en el agua tratada del orden de  $5^\circ \text{C}$ .

#### **VII.3.3.15 ÓSMOSIS INVERSA.**

La ósmosis inversa ocurre cuando dos soluciones con diferentes concentraciones de sales se encuentran separadas por una membrana semipermeable. En este proceso el agua fluye a través de la membrana de la solución con menor concentración de sales hacia el lado que contiene agua con mayor cantidad de sales, hasta que se equilibre la concentración de sólidos totales; el fenómeno inverso en la membrana, se obtiene aplicando una presión al líquido que contiene mayor cantidad de sales hacia el de menor, invirtiendo el flujo.

Este proceso ha demostrado ser particularmente efectivo en la remoción de un gran porcentaje de la turbiedad presente en las aguas residuales, así como sólidos disueltos, virus, materia orgánica, bacterias y sales inorgánicas. El porcentaje de remoción de sólidos disueltos es del 73%.

#### **VII.3.3.16 INTERCAMBIO IÓNICO**

El intercambio iónico es un proceso a través del cual, iones de una clase dada, son desplazados de un material de intercambio insoluble por iones, de una clase diferente que se encuentra en una solución.

En el caso de remoción de amoniaco, sodio y calcio, son removidos de una resina natural de zeolita y remplazados por iones de amoniaco contenidos en el agua residual. Este proceso se denomina selectivo; ya que la resina remueve "selectivamente" iones de amoniaco de una solución que también contiene iones de sodio, calcio y magnesio.



En este proceso el agua es percolada a través de un lecho de resina selectiva, en la que se desarrolla el proceso de intercambio antes descrito.

Cuando en el efluente del proceso se empiezan a presentar concentraciones de amoniaco superiores a las condiciones de diseño, se tiene la necesidad de regenerar la resina para devolverle su capacidad de intercambio original. Este proceso de regeneración se lleva a cabo al hacer pasar una solución concentrada de sales a través del lecho de resina. El efluente obtenido de este proceso de regeneración, con un alto contenido de amoniaco, es conducido a algún tipo de tratamiento para removerlo, como pueden ser torres de separación, separación por vapor, electrólisis, etc.

Una de las desventajas del empleo de intercambio iónico selectivo es que este proceso es poco sensible a cambios de temperatura, a la vez que adiciona cantidades relativamente pequeñas de sólidos disueltos a las aguas tratadas con este medio.

Así mismo, la capacidad de remoción de amoniaco con esta resina es muy predecible al conocer la concentración de iones amoniaco en el influente del proceso, sin requerirse estudios piloto para ello. En este proceso es común el empleo de reactores a presión, similares a los empleados en la filtración y para regenerar la resina se emplea una solución de cloruro de sodio al 2%.

El sulfato de amoniaco obtenido en el tratamiento del regenerador en plantas grandes, puede ser empleado como fertilizante.

La eficiencia de remoción de  $N-NH_3$  mediante el proceso de intercambio iónico selectivo, es en promedio de un 84%.

#### ***VII.4 ESQUEMAS DE LOS COMPONENTES QUE CONFORMAN UN PROCESO DE TRATAMIENTO.***

Teniendo como base, la descripción de los procesos unitarios para el tratamiento de las aguas residuales, en sus diferentes etapas para la remoción de los distintos parámetros de contaminación (preliminar, primario, secundario, terciario y avanzado), se llevó a cabo el análisis de las diferentes alternativas para acondicionar las aguas residuales para la recarga del acuífero.

Este análisis corresponde a la confiabilidad esperada en los trenes de tratamiento para la remoción de los diferentes parámetros de contaminación, dichos trenes de tratamiento representan a los niveles de tratamiento, ya definidos que se han considerado para su análisis y se incluye, para cada caso, los procesos unitarios que los integran, remarcando la parte del tratamiento avanzado, que es la que le da a las aguas residuales crudas la calidad necesaria para poder recargarla a los acuíferos.



En el esquema 1 (ver Anexos), se presenta un diagrama de flujo con un sistema de tratamiento integrado por: Cribado, desarenador, Tratamiento primario, Tratamiento secundario, filtración y como tratamiento avanzado: adsorción con carbón activado para remoción de materia orgánica oxidada y en su caso de materia orgánica productora de olor, color y sabor; y osmosis inversa, para remoción de sólidos disueltos, virus, compuestos orgánicos sintéticos y la desinfección.

En el esquema 2 (ver Anexos), se presenta un diagrama de flujo con un sistema de tratamiento integrado por: Cribado, Desarenador, tratamiento primario, tratamiento secundario, coagulación-floculación; filtración, y como tratamiento avanzado, adsorción con carbón activado para remoción de materia orgánica oxidada y en su caso de materia orgánica productora de color, olor y sabor, y desinfección.

En el esquema 3 (ver Anexos), se presenta un diagrama de flujo con un sistema de tratamiento integrado por: Cribado, Desarenador, tratamiento primario, tratamiento secundario por medio de lodos activados, nitrificación biológica, tratamiento con cal en dos fases, filtración por medio doble, y como tratamiento avanzado: adsorción con carbón activado para remoción de materia orgánica oxidada y en su caso de materia orgánica productora de color, olor y sabor, e intercambio iónico, para remoción de sólidos disueltos (sales) y desinfección.

En el esquema 4 (ver Anexos), se presenta un diagrama de flujo con un sistema de tratamiento integrado por: regulación, despumación, tratamiento químico, desorción filtración, ozonación, y como tratamiento avanzado, adsorción con carbón activado para remoción de materia orgánica oxidada y en su caso de materia orgánica productora de color, olor, y sabor, osmosis inversa, para remoción de sólidos disueltos, virus, compuestos orgánicos sintéticos y desinfección.

En el esquema 5 (ver Anexos), se presenta un diagrama de flujo con un sistema de tratamiento integrado por: tratamiento preliminar (cribado y desarenado); tratamiento primario, tratamiento secundario, filtración y desinfección.

En el esquema 6 (ver Anexos), se presenta un diagrama de flujo con un sistema de tratamiento integrado por: tratamiento preliminar (cribado y desarenado); tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento con cal, floculación, clarificación, filtración, y como tratamiento avanzado: intercambio iónico para remoción de sólidos disueltos (sales), además de, adsorción con carbón activado para remoción de materia orgánica oxidada y en su caso de materia orgánica productora de color, olor y sabor, osmosis inversa, para remoción de sólidos disueltos, virus, compuestos orgánicos sintéticos, ozonación y desinfección.



## **CAPITULO VIII**

### **BENEFICIOS, RIESGOS Y CATASTROFES DE LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUIFEROS CON AGUAS RESIDUALES.**

El presente capítulo es incluido con especial atención, en lo que se refiere a los beneficios, los cuales hemos podido conocer a lo largo del presente trabajo (Capítulo III), los riesgos que se corren, al no efectuar un proyecto adecuado de tratamiento de aguas residuales y estudio de cada caso (calidad de agua del acuífero, ubicación, etc.) y por otro lado las catástrofes que podría provocar el recargar un acuífero con agua residual tratada.

De la misma forma, es necesario mencionar que la fuente de información del presente capítulo, fue tomada de la revista Ingeniería Civil (Colegio de Ingenieros Civiles de México, Marzo 1998, paginas 11 y 12), la cual se expondrá en forma textual:

"A continuación se presentará una breve descripción a cerca de los efectos que pueden esperarse por causa de la utilización del agua residual tratada en las técnicas de recarga de acuíferos.

#### **BENEFICIOS**

Los objetivos benéficos que se persiguen con la recarga artificial son:

- Restaurar el acuífero que ha sido excesivamente explotado, quizás de esta forma se prolongará su vida útil, hasta que se disponga de otro modo de abastecimiento.
- Combatir la intrusión salina creando barreras hidráulicas apropiadas en acuíferos costeros.
- Depuración del agua residual a través del contacto con el suelo en forma de tratamiento terciario como lo es la filtración.
- Reducir la subsidencia del suelo por exceso del bombeo, (no restituye los niveles iniciales, solo se detiene o frena)
- Utilizar el agua residual en yacimientos petrolíferos como una forma de inyección y hacer ascender el petróleo utilizando el agua como un colchón que por la diferencia de densidades, el petróleo flotará encima del agua hasta llegar a la superficie.



## RIESGOS

Los efectos indeseables que se pueden presentar o que se deberán de tener en cuenta en un proceso de recarga artificial con aguas residuales son:

- La posible contaminación a otros acuíferos o pozos de abastecimiento doméstico, industrial y agrícola cercanos al proyecto.
- La obstrucción de los poros del suelo provocado por sólidos suspendidos y materia orgánica presente en el agua residual, haciendo que la permeabilidad del acuífero disminuya perdiendo la capacidad de conducir el agua en cantidades significativas.
- La presencia de malos olores provocados por condiciones anaerobias en el manejo del agua residual, que puedan difundirse hasta zonas de asentamientos humanos originando molestias y preocupaciones estéticas y de salud. La proliferación de insectos causada por el estancamiento del agua residual que pudiera originar molestias y transmisión de enfermedades a las personas.

Para evitar estos efectos indeseables, se recomienda un tratamiento por desarenado y sedimentación del agua residual como mínimo y en algunos casos más especiales hasta un tratamiento biológico o de tipo avanzado, si existen pozos de abastecimiento público cercanos y el acuífero sea de muy buena calidad y de vulnerabilidad alta.

Dentro de los factores limitantes en la aplicación de las aguas residuales a recargar las aguas subterráneas, posiblemente el más importante de ellos, es el aporte de nitrógeno en forma de nitratos que al ser recuperada el agua en pozos que sirven de abastecimiento pueden provocar perturbaciones en la sangre de los niños (cianosis o metemos globinemia) en concentraciones mayores de 45 mg/l, y dar origen a problemas de eutrofización en lagos que reciben aportaciones del agua subterránea.



## CATASTROFES

### *Indicador de aproximación de sismos.*

Los científicos llevan varios años trabajando en la tarea de como pronosticar la aproximación de los sismos con el objetivo de prevenir a la población.

Científicos soviéticos descubrieron que los sismos son acompañados de oscilaciones ultrasónicas que crecen hasta el momento crítico contribuyendo al desprendimiento del elemento químico radón, el cual satura las aguas minerales de la región.

Antes del sismo, aumenta bruscamente el contenido de radón en las aguas y después de la sacudida disminuye gradualmente hasta la magnitud inicial. De manera que esta variación en la composición de las aguas subterráneas puede ser utilizada para pronosticar la proximidad de los sismos.

Esto es poco sensible para sacudidas débiles pero ya a partir de sacudidas cuya fuerza es de 4 a 5 grados en la escala de Richter, el pronostico es bastante factible (80 - 90% de probabilidad).

## HIDROSISMOS

En los años 50, se descubrió que las aguas subterráneas pueden dar origen a sismos por el aumento de la presión existente en el acuífero debido a la recarga provocada por grandes embalses construidos, como el caso del embalse o presa Boulder, conocido actualmente como Hoover, en los Estados Unidos.

Cuando en el año de 1935 comenzó el llenado de la presa Hoover y el nivel alcanzó los 100 metros, tuvo lugar el primer sismo, continuando con nuevas sacudidas a medida que el nivel subía.

En 1937, el embalse alcanzó la magnitud del proyecto (145 metros) y se registraron casi 100 sacudidas.

Otro caso que resulto catastrófico, ocurrió con el embalse de Koin (India) donde al comenzar a llenarse produjo una serie de sacudidas, especialmente una, la cual en el año 1967 llegó a los 9 grados provocando la muerte de más de 200 personas y cerca de 2000 heridos.

Sismos comparativamente débiles se han registrado en algunos nuevos embalses en España, Brasil y Argelia, entre otros países.



Así mismo, estudios de campo han revelado que la inyección de aguas residuales en pozos profundos, pueden provocar sismos. Un caso es el de la inyección de residuos químicos industriales cerca de Denver Colorado (E.U.) en un pozo de 3671 metros de profundidad y penetrando rocas sedimentarias hasta rocas cristalinas precámbricas.

La mayoría de los sismos fueron de pequeña magnitud dentro del rango de 1.5 a 4.4 grados en la escala de Richter. Se originaron más de 1500 sacudidas durante 5 años. Estos Hidrosismos han sido registrados también en localidades de países como Dinamarca, Egipto, África del Sur Filipinas y Australia.

### CONCLUSIONES (CONSIDERACIONES FINALES DEL CAPITULO)

La recarga artificial de acuíferos con aguas residuales, sin duda, tiene un futuro prometedor como método de alivio a las preocupaciones del agotamiento de las fuentes de agua limpia para uso potable, con el propósito de sustituir y liberar las aguas de buena calidad, que son utilizadas en actividades que requieren solo de una calidad mínima suficiente (como el caso de la agricultura e industria) y sean incorporadas las aguas liberadas al sistema de abastecimiento de agua potable.

Con relación a las causas que provocan los Hidrosismos, por el momento no están del todo claras. Pero sin duda que el papel principal lo juega la tensión adicional creada por la columna de agua en las grietas (fallas o fisuras) y poros de las rocas, más que por las dimensiones o el volumen del agua residual de recarga.

En el futuro desarrollo de los recursos hidráulicos en México, las fuentes de abastecimiento seguirán siendo afectadas por la contaminación y sobreexplotación debidas al desarrollo industrial y al crecimiento demográfico y a la falta de orientación y concientización de la comunidad en el sentido de que el agua es un recurso renovable hasta un límite que la naturaleza lo sostenga"



## CONCLUSIONES GENERALES

Con el presente trabajo, podemos comenzar a concientizarnos de los problemas que acarrea el no dar un uso eficiente al agua: la sobreexplotación de acuíferos, que además de la escasez de agua que es provocada por el crecimiento demográfico y su creciente demanda, es el extraer agua de mantos acuíferos cada vez más alejados, provocando que los costos sean aun más altos por el entubamiento para traerla, y más aún los graves problemas que se han producido por el hundimiento diferencial de terreno, el cual se da constantemente, esto repercute de tal forma que se debilitan los cimientos de los edificios, haciéndolos más vulnerables a los sismos y provocando inestabilidad en la red de distribución de agua potable y drenaje, ya que con el hundimiento del suelo rompe la infraestructura urbana hidráulica de la ciudad propiciando fugas de agua de la red de distribución. Y por otra parte al quebrarse los tubos del drenaje, las aguas residuales se infiltran en el subsuelo contaminando progresiva y crecientemente los mantos acuíferos.

Por ello, la alternativa de sanear el agua residual con objeto de infiltrar o inyectarla al acuífero es de gran importancia, para lo cual se pueden aplicar las experiencias obtenidas en otros países y el nuestro, ya que con ello se estarían atacando estos graves problemas.

En el presente trabajo, no se ha considerado el tratamiento de agua de lluvia para recarga artificial, ya que comparado con la demanda de agua potable a mediano plazo, es mínima.

Además podemos concluir que el agua subterránea a diferencia del agua superficial presenta ciertas ventajas, ya que el agua subterránea no se evapora, sobre todo si se trata de terrenos con cubierta vegetal. Y en general se puede decir que las aguas subterráneas cercanas a la superficie, están más propensas a la contaminación, mientras que las aguas profundas son de mayor pureza.

Es importante indicar que en lo que se refiere al tipo, diseño y zona de recarga, que están determinados por el análisis económico de cada opción, El diseño particular de cada sistema de recarga, dependerá del sitio elegido y condiciones particulares que presente, esto a través de pruebas de campo.



Además de que el agua que se utilice para la recarga artificial, por medio de la infiltración o por inyección, deberá cumplir al menos con la calidad del agua subterránea del sitio donde se lleve a cabo la recarga. Esto es, que una vez definido el sitio y gasto de recarga, se determinen las características de calidad del agua subterránea en el sitio, con el fin de tener un punto de partida de la calidad mínima del efluente.

Los distintos procesos de tratamiento que se presentan en este trabajo, consideran como parte fundamental la aplicación del tratamiento avanzado, el cual puede ser remoción de amoníaco, ósmosis inversa, adsorción con carbón activado, etc. O una combinación de los mismos, ya que de acuerdo a los porcentajes de remoción de los diferentes parámetros de contaminación, al aplicar estos procesos, se garantizaría obtener un efluente de elevada calidad que cumpla con la normatividad para poder recargar el acuífero por medio de métodos de profundidad.

Referente a las catástrofes que pudieran ocurrir al recargar agua residual al acuífero, es aún, un punto de discusión, ya que aún se presentan únicamente casos hipotéticos, siendo tal vez el principal motivo que ocasiona los hidrosismos, la tensión adicional en grietas o fisuras, creada por la columna de agua, en donde sería conveniente realizar estudios futuros que den un mayor grado de certidumbre, además de que es conveniente hacer énfasis de que cualquier tipo de recarga que se realice al acuífero debe presentar algún grado de tratamiento.

Finalmente un punto importante sería el promover en las plantas de tratamiento, un proceso de tratamiento avanzado, aunque esto podría significar costos muy elevados, por lo cual, tal vez proyectos o soluciones pudieran quedar inconclusas.



# ANEXOS



*UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARAGON  
INGENIERIA CIVIL*



# GLOSARIO DE TERMINOS Y ABREVIATURAS



## **GLOSARIO DE TERMINOS Y ABREVIATURAS**

**ABSORCIÓN.** Penetración superficial de un gas ó un líquido en un sólido.

**ACUIFERO.** Ver SISTEMA ACUÍFERO.

**ACUIFERO CONFINADO:** Acuífero en el que el agua del subsuelo se encuentra confinada a presión entre estratos impermeables o semipermeables de tal forma que el nivel pizométrico correspondiente al estrato está a nivel superior que la frontera mas alta que el mismo.

**ACUIFERO LIBRE.** Acuífero en el que su superficie superior de la zona de saturación se localiza en su nivel freático y al construir un pozo de agua ésta se elevará de manera natural hasta llegar al nivel freático.

**ADSORCION:** Es la adhesión, provocada por atracciones eléctricas o químicas, de las moléculas de un gas, un líquido o una sustancia disuelta en una superficie. Este fenómeno es típico en la superficie del carbón activado, cuando se usa para la eliminación de sustancias orgánicas disueltas y el cloro.

**AGUA RESIDUAL:** Agua que contiene residuos, es decir, materias sólidas o líquidas evacuadas como desechos tras un proceso industrial, agrícola o domestico.

**AGUA SUBTERRANEA.** Agua contenida en el subsuelo, procedente de la infiltración (precipitaciones) El agua infiltrada circula por el subsuelo hasta llegar a una zona de acumulación limitada por capas impermeables, formando una capa freática.

**AIREACION:** Adición de aire al agua que produce un incremento de su nivel de oxígeno disuelto.

**ALCALINIDAD:** Cantidad de cationes equilibrados por ácidos débiles, expresada como miliequivalentes de iones de hidrógeno neutralizados, por litro de agua.

**ANAEROBIO** Organismo que solo puede vivir sin contacto con el oxígeno libre. No requiere oxígeno para vivir o multiplicarse.

**ARCILLA.** Roca sedimentaria detrítica de grano fino, formada a partir de sedimentos marinos y lacustres de partículas de tamaño muy pequeño. Es una roca blanda que se endurece por acción del calor. En su composición intervienen, entre otros, minerales arcillosos y cuarzo. Las arcillas tienen la propiedad de absorber agua hasta un cierto límite, aumentando su volumen y haciéndose impermeables. La presencia de una capa de arcilla en el subsuelo detiene la infiltración de agua y puede permitir la acumulación de agua subterránea. En los terrenos arcillosos, las variaciones de volumen de las arcillas por pérdida y ganancia de agua pueden producir.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**AZUD:** Pequeña presa construida en la presa de un río, con el fin de derivar el agua para su posterior utilización, especialmente en regadío.

**CARBON ACTIVADO:** Material que se utiliza para adsorber impurezas orgánicas del agua. Proviene de la madera, de la lignita. El material es "tostado" a alta temperatura para obtener el carbón. El carbón se activa oxidándolo por el tratamiento con vapor a alta temperatura. Se produce en forma granular o en polvo.

**CAUDAL.** Volumen de agua que pasa por unidad de tiempo a través de una sección dada de un curso o conducción de agua.

**CLORO:** Un elemento químico que se utiliza para matar microorganismos presentes en el agua.  
A temperatura ambiente y presión atmosférica es un gas amarillo.

**COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD:** Es la velocidad de descarga del agua, bajo condiciones de flujo laminar, a través de una dada sección transversal unitaria de un medio poroso (por ejemplo: un suelo), medida en condiciones estándares de presión y temperatura.

**COLIFORMES FECALES:** Con este término se designan principalmente a los ordenes de bacterias *Escherichia* y *Klebsiella* spp. Las bacterias de ésta familias son indicadoras por excelencia de contaminación fecal del agua por heces de origen humano principalmente.

**COLMATACION:** Deposition de partículas finas tales como arcillas o limo en la superficie y en los poros de un medio poroso permeable, por ejemplo el suelo, y que tiene como efecto una reducción de la permeabilidad.

**CONDUCTIVIDAD ELECTRICA:** Es una medida de la habilidad que tiene una solución para conducir la corriente eléctrica. La unidad de medición es el siemen/centímetro.

**CONFIGURACION PIZOMETRICA.** Nivel del agua subterránea determinado con un piezómetro

**DEPOSITOS ALUVIALES:** Materiales no consolidados, de época reciente.

**CONFINAR.** Aislar diversos materiales en recipientes o sitios adecuados para su almacenamiento y disposición final.

**CUENCA:** Unidad fisiográfica que contiene un gran acuífero o varios conectados o interrelacionados, cuyas aguas fluyen a un desagüe común, y que está delimitada por una divisoria de aguas subterráneas.

**DBO:** índice de contaminación del agua que representa el contenido en el agua de sustancias bioquímicamente degradables.



**DESIONIZACION:** Es la eliminación de iones disueltos en el agua. Se logra, pasando el agua a través de recipientes rellenos de resinas de intercambio, las cuales cambian el ion hidrógeno por cationes y el ion oxhidrilo por los aniones. Las impurezas iónicas permanecen unidas a las resinas y los iones hidrógeno y oxhidrilo, se combinan para formar agua, así el producto de salida es agua desionizada.

**DESPUMACION:** Desviación de las capas superficiales de una corriente de agua, embalse, etc., mediante un dispositivo de vertedero superficial.

**DIGESTOR:** La digestión es un proceso microbiológico que convierte el lodo, orgánicamente complejo, en metano, dióxido de carbono y un material inofensivo similar al humus. Las reacciones se producen en un tanque cerrado o digestor, y son anaerobias, esto es, se producen en ausencia de oxígeno.

**DQO:** Concentración másica de oxígeno equivalente a la cantidad de un oxidante específico consumido por materias en disolución o en suspensión cuando se trata una muestra de agua con ese oxidante bajo condiciones definidas.

**DUREZA TOTAL:** Propiedad del agua, principalmente debida a la presencia de bicarbonatos, cloruros y sulfatos de calcio y magnesio, que evita que el jabón forme espuma abundante.

**EMIGRACIÓN.** Cambio de residencia habitual desde una unidad político-administrativa hacia otra, en un momento dado, considerando el lugar donde se origina el movimiento.

**ESCORRENTÍA:** Movimiento superficial de aguas continentales no encauzadas a favor de la pendiente. La forma de movimiento del agua puede ser laminar, turbulenta o de arroyada.

**GEOLOGÍA.** Ciencia que estudia la composición, estructura y desarrollo de la corteza terrestre y sus capas mas profundas.

**HIDROLOGÍA.** Ciencia que estudia los fenómenos y procesos que transcurren en la hidrósfera. Se subdivide en hidrología superficial, hidrología subterránea y oceanología. En cada caso, estudia el régimen y el balance hídrico, la dinámica del agua, los procesos termales y las sustancias agregadas. Estudia el ciclo del agua en la naturaleza, la influencia sobre el mismo de la actividad humana, y su evolución en territorios determinados y en la tierra en conjunto.

**HISTERISIS:** Variabilidad de la relación altura-caudal en una estación de aforo sujeta a variaciones de la pendiente de la superficie del agua en virtud de las cuales, para un mismo nivel de agua, el caudal es diferente cuando el nivel crece y cuando decrece.



**INFILTRACIÓN.** Penetración del agua a través de la superficie terrestre hacia el subsuelo o la penetración del agua desde el suelo a las alcantarillas u otras tuberías a través de juntas, conexiones o túneles defectuosos.

**INMIGRACIÓN.** Desplazamiento que implica el cambio de residencia habitual desde una unidad político-administrativa hacia otra, en un momento dado, visto desde la óptica del lugar de llegada.

**INTRUSION SALINA:** Fenómeno que se produce cuando una masa de agua salada invade una masa de agua dulce. Se puede producir en aguas superficiales o subterráneas.

**MIGRACIÓN.** Desplazamiento que implica el cambio de residencia habitual desde una unidad político-administrativa hacia otra, en un momento dado.

**NIVEL FREÁTICO** Superficie de agua que se encuentra en el subsuelo bajo el efecto de la fuerza de gravitación y que delimita la zona de aireación de la de saturación.

**PERCOLACIÓN:** Movimiento de agua por gravedad en la zona de aireación, desde la superficie del terreno hacia el nivel freático.

**PERMEABILIDAD:** Propiedad de un medio poroso que permite el movimiento de líquidos y gases a través de él, bajo la acción combinada de la gravedad y la presión.

**PH:** Valor absoluto del logaritmo decimal de la concentración de ion hidrógeno (actividad). Usado como indicador de acidez ( $\text{pH} < 7$ ) o de alcalinidad ( $\text{pH} > 7$ ).

**PIEZÓMETRO.** Aparato para medir el nivel del agua subterránea. Es un tubo, cuyo extremo inferior permite el ascenso de agua por su propia presión hidrostática, que debe introducirse en una perforación realizada en el subsuelo.

**POROSIDAD:** Relación entre el volumen de intersticios en una muestra dada de un medio poroso, por ejemplo suelo, y el volumen bruto del medio poroso, incluidos los huecos.

**RECARGA DE ACUIFEROS.** Aporte de agua a los acuíferos. La recarga natural procede del agua de infiltración o agua superficial de las precipitaciones que se infiltra en el terreno, del agua de ríos y lagos, y en acuíferos litorales, incluso del agua del mar.

**RED DE DISTRIBUCIÓN:** Conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde el tanque de almacenamiento o planta de tratamiento hasta los puntos de consumo.

**REPRESA:** presa, barrera; dique



**RESPIRACION ENDOGENA:** es la etapa de autodestrucción de las células viejas para el aprovechamiento de su energía, para renovar la biomasa.

**SEDIMENTACION:** Proceso de depósito y asentamiento por gravedad de la materia en suspensión en el agua.

**SISTEMA ACUÍFERO:** Formación geológica, o grupo de formaciones, o parte de una formación, capaz de acumular una significativa cantidad de agua subterránea, la cual puede brotar, o se puede extraer.

**SOBREEXPLOTACIÓN** Extracción de un recurso natural a una tasa superior a la de regeneración, lo que puede conducir al agotamiento del recurso.

**SOCAVACION:** Acción erosiva - en particular, erosión local pronunciada - del agua en cauces, excavando y arrastrando materiales del lecho y las márgenes.

**SOLIDOS TOTALES DISUELTOS:** Peso total de componentes minerales disueltos en el agua por unidad de volumen o peso de la muestra de agua.

**SOLIDOS SUSPENDIDOS:** Son los sólidos no disueltos y que pueden ser removidos por filtración.

**TURBIDEZ:** Condición de un líquido debida a los materiales finos, visibles, en suspensión, que impide el paso de la luz a través del líquido.



## ABREVIATURAS

ZMCM - Zona Metropolitana de la Ciudad de México  
DGCOH - Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica  
CNA - Comisión Nacional del Agua  
DDF - Departamento del Distrito Federal  
GAVM - Gerencia de Aguas del Valle de México  
Mm<sup>3</sup>/año - Millones de metros cúbicos por año  
m<sup>3</sup>/seg. - metros cúbicos por segundo  
col./mil. - Coliformes por mililitro  
DBO - Demanda Biológica de Oxígeno  
DQO - Demanda Química de oxígeno  
ST - Sólidos Totales  
SST - Sólidos Suspendidos Totales  
Ssed - Sólidos Sedimentados  
SDT - Sólidos Disueltos Totales  
pH - Potencial de hidrógeno  
N-NH<sub>2</sub> - Nitritos  
N-NH<sub>4</sub> - Nitratos  
P-PO<sub>4</sub> - Fosfato  
Cl<sub>2</sub> res - Cloros  
B - Boro  
SO<sub>4</sub> - Sulfato  
Na - Sodio  
Fe - Hierro  
Mn - Manganeseo  
K - Potasio  
Pb - Plomo  
Cd - Cadmio  
Hg - Mercurio  
As - Arsénico  
Cr - Cromo  
Zn - Zinc  
Cu - Cobre  
Se - Selenio  
Ca - Carbonatos  
F - Flour  
Ca - Calcio  
Al - Aluminio  
Ba - Bario  
Cn - Cianuro



**PROGRAMA DE MATRIZ**  
**DE LESLIE PARA**  
**PROYECCION DE**  
**POBLACION (Q- BASIC)**



## PROGRAMA DE MATRIZ DE LESLIE PARA PROYECCION DE POBLACION (Q- BASIC)

```
10 DIM D(10,10) N(10,10) MT(5) PT(5) PI(10) R(10,10) R1(10,10)
20 DIM RM(10) A(10) H1(10) L(10,10) DP(10) DL(10) HT(10)
30 OPEN "A:ZUM.DAT" FOR INPUT AS #1
40 OPEN "A:REZUM.DAT" FOR OUTPUT AS #2
50 REM
60 REM 'LECTURA DE DATOS'
70 REM
80 INPUT #1, P$
90 INPUT #1, NI
100 INPUT #1, NCP1
110 FOR I = 1 TO NI
120 INPUT #1, D(I, 1), N(I, 1)
130 NEXT I
140 INPUT #1, NCP2
150 FOR I = 1 TO NI
160 INPUT #1, D(I, 2), N(I, 2)
170 NEXT I
180 INPUT #1, M1, M2
190 REM
200 REM 'CALCULO DEL PROMEDIO DE HIJAS POR CATEGORIA'
210
220 FOR I = 1 TO NI - 1
230 J = 1
240 PI(I) = (D(I + 1, J + 1) / D(I, J)) - M1
250 NEXT I
260 R1(1, 1) = N(1, 1)
270 R1(2, 1) = N(2, 1)
280 SUM3 = D(1, 1)
290 FOR I = 3 TO NI
300 J = 1
SUM3 = SUM3 + D(I - 1, J)
R1(I, J) = N(I, J) * D(1, 1) / SUM3
330 NEXT I
340 RMAX = 0
350 FOR I = 1 TO NI
J = 1
370 IF R1(I + 1, J) < R1(I, J) THEN 390
380 GOTO 400
390 IF R1(I + 1, J) > RMAX THEN RMAX = R1(I + 1, J)
```

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



```
400 NEXT I
410 FOR I = 1 TO NI
420  A(I) = R1(I, 1) / RMAX
430 NEXT I
440 SUM = 0
450 FOR I = 2 TO NI
SUM = SUM + (A(I) * D(I, 1))
470 NEXT I
480 DMD = SUM
490 H12 = D(1, 2) / ((1 + M1) * DMD)
500 C = 1
510 FOR I = 1 TO NI
520  H1(I) = A(I) * H12 * C
530 NEXT I
540 REM
550 REM 'CALCULO DE LOS COEFICIENTES DE LA MATRIZ DE LESLIE'
560 REM
570 FOR J = 1 TO NI
580  L(1, J) = H1(J) * (1 + M2)
590 NEXT J
600 FOR I = 2 TO NI
610  FOR J = 1 TO NI
620    L(I, J) = 0
630  NEXT J
640 NEXT I
650 FOR I = 2 TO NI
660  L(I, I - 1) = P1(I - 1) * (1 + M2)
670 NEXT I
680 FOR I = 1 TO NI
690  DL(I) = D(I, 2)
700  K = 0
710 NEXT I
720 SUM6 = 0
730 K = K + 1
740 FOR J = 1 TO NI
750  SUM6 = SUM6 + L(I, J) * DL(J)
760 NEXT J
770 DP(1) = SUM6
780 SUM7 = 0
790 FOR I = 2 TO NI
800  SUM7 = 0
```



```
810 FOR J = 1 TO NI
820 SUM7 = SUM7 + L(I, J) * DL(J)
830 NEXT J
840 DP(I) = SUM7
850 NEXT I
860 SUM8 = 0
870 REM
880 PRINT 'LA POBLACION FUTURA POR CATEGORIA ES'
890 FOR I = 1 TO NI
900 PRINT DP(I)
910 SUM8 = SUM8 + DP(I)
920 NEXT I
930 PRINT 'LA POBLACION TOTAL FEMENINA ES ';SUM8
940 PTT = 2 * SUM8
950 PRINT 'LA POBLACION TOTAL ES ';PTT
960 PRINT 'DESEA OTRO VALOR DE MIGRACION, SI=1, NO=2'
970 INPUT RA
980 IF RA = 2 THEN 1020
990 PRINT ' CUAL ES EL NUEVO VALOR DE MIGRACION'
1000 INPUT M2
1010 GOTO 570
1020 PRINT 'DESEA LA PREDICCION DE POBLACION PARA UN INTERVALO
MAS'
1030 PRINT 'SI=1, NO=2'
1040 INPUT AA
1050 IF AA = 1 THEN 1080
1060 GOTO 1120
1070 PRINT 'LA NUEVA POBLACION POR CATEGORIA ES'
1080 FOR I = 1 TO NI
1090 DL(I) = DP(I)
1100 NEXT I
1110 GOTO 720
1120 END
```



*UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO*  
*ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARAGON*  
*INGENIERIA CIVIL*



# **TABLAS Y ESQUEMAS**



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARAGON  
INGENIERIA CIVIL



**NORMA OFICIAL**  
**MEXICANA**

**NOM-127-SSA1-1994**



## **BIBLIOGRAFIA:**

- ATHIE, L, "Calidad y Cantidad del Agua en México"  
Ed. Universo XXI, 1987
- BENITEZ, ALBERTO, "Captación de Aguas Residuales"  
Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, 1972
- CALAHORRA, P, "Introducción a la Recarga de Acuíferos"  
C.N.A. Subgerencia de Aguas del Valle de México, 1994
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (C.N.A.), "Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento"  
México, 1994
- CONAPO, "Población de los Municipios de México 1950-1990"  
1994
- CUSTODIO, E, "Hidrología Subterránea" Tomo II  
Ed. Omega, Barcelona, 1976
- DGCOH, "Estudio de Zonificación y Caracterización del Agua Residual de la Red de Drenaje del DF."  
México, 1996
- DGCOH, "Plan de Acciones Hidráulicas 2001- 2005"  
Delegaciones: Azcapotzalco, Alvaro Obregon, Benito Juárez, Coyoacán, Cuauhtémoc, Cuajimalpa, Iztacalco, Iztapalapa, Gustavo A Madero, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Miguel Hidalgo, Tláhuac.
- DGCOH, DDF, "Plan Maestro de agua Potable de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México"  
1995-2010
- IMTA, "Sobre explotación y Contaminación en Aguas Subterráneas."  
Notas, C.N.A, 1990
- INEGI, "IX Censo General de Población, 1970"  
1971
- INEGI, "X Censo General de Población y Vivienda, 1980"  
1984
- INEGI, "XI Censo General de Población y Vivienda, 1990"  
1991



- METCALF y EDDY, "Ingeniería Sanitaria ( Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales)"  
Ed. Labor, Barcelona, 1985
- MERRIT FREDERICK S. "Manual del Ingeniero Civil" Tomo IV  
Ed. MC Graw Hill, México, 1994
- RAMALHO, R S, "Tratamiento de Aguas Residuales"  
Ed. Revert, Barcelona, España, 1991
- REVISTA HIDRAULICA URBANA DGCOH, "Balance de Agua Subterránea del Acuífero de la Cd. de México"  
DGCOH, No. 4, 1998
- REVISTA HIDRAULICA URBANA DGCOH, "Recarga del Acuífero con Agua Residual Tratada"  
Lesser, No. 5, Jun. 1999
- REVISTA, INGENIERIA CIVIL  
Colegio de Ingenieros Civiles de México, Marzo 1998
- REVISTA INGENIERIA HIDRAULICA Y CIENCIAS AMBIENTALES "No. 49"  
México, julio- agosto 99
- REVISTA INGENIERIA HIDRAULICA Y CIENCIAS AMBIENTALES "No. 50"  
México, septiembre- octubre 99
- REVISTA TLALOC "No. 18, Abril- Junio"  
Ed. Trilce, SA, CV, México 2000

**Páginas en Internet:**

[www.ineggi.gob.mx/difusion/espanol/población/definitivos/mx/sintesis/población.pdf](http://www.ineggi.gob.mx/difusion/espanol/población/definitivos/mx/sintesis/población.pdf)  
[www.todo-ciencia.com/geologia/oi35601400d990262708.pdf](http://www.todo-ciencia.com/geologia/oi35601400d990262708.pdf)  
[www.terralia.com/revista15/pagina42.htm](http://www.terralia.com/revista15/pagina42.htm)  
[www.cicm.fi-p.unam.mx/cicm/WEB-Congreso/Agua\\_medio\\_ambiente.html](http://www.cicm.fi-p.unam.mx/cicm/WEB-Congreso/Agua_medio_ambiente.html)  
[www.cicm.fi-p.unam.mx/cicm/WEB-Congreso/Usos\\_agua\\_energia.html](http://www.cicm.fi-p.unam.mx/cicm/WEB-Congreso/Usos_agua_energia.html)  
[www.cepis.org.pe/eswww/fulltext/repind53/rys/rys.html](http://www.cepis.org.pe/eswww/fulltext/repind53/rys/rys.html)  
<http://monografias.com/trabajos10/contam/contam.shtml#cont>

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TABLA 1

VALORES PROMEDIO DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRANEA EN POZOS DE LA CD. DE MEXICO

PARAMETRO	ZONA DE UBICACIÓN Y NUMERO DE POZO											
	AEROPUERTO				STA CATARINA			ESTADIO AZTECA				
	4	38	114R	160	SC-6	SC-12	247	PER-4	PER-6	226	PER-14	266
<b>SOLID. TOTALES</b>	664.7	454.5	365.6	665	1202	1572	2242.7	332	171.4	198	240.6	293.5
<b>CTA. ESTANDAR (col/ml)</b>	675	1155	283.3	256	87.5	1106	1026.6	112.0	220.1	262	252.1	988
<b>CLORUROS</b>	145.8	61.8	23.2	137	117	160.9	261.1	14.5	7.8	8.1	26.8	42.4
<b>NITROGENO AMONICAL</b>	2.6	1.6	0.38	1.98	0.55	7.0	2.0	0.09	0.09	0.1	0.1	0.1
<b>SULFATOS</b>	4.4	3.7	34.1	1.9	269	234.9	521.2	152.8	8.8	15.0	19.4	22.3
<b>CALCIO</b>	26.2	26.7	7.3	48.7	55.9	38.6	54.2	21.2	7.5	10.5	11.8	10.7
<b>HIERRO</b>	0.4	0.3	0.07	0.63	0.07	0.07	0.52	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05
<b>MANGANESO</b>	0.2	0.3	0.02	0.92	0.12	0.11	0.27	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
<b>POTASIO</b>	28.0	13.2	13.5	21.5	25.2	43.3	42.5	5.9	2.8	4.1	4.2	5.5
<b>SODIO</b>	612	77.5	84.0	196	252	427.1	572.6	26.1	15.7	17.4	33.6	47.0

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



TABLA 2

ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO I  
 CALIDAD ESPERADA DEL EFLUENTE DE ACUERDO CON LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN

PARAMETRO	Agua Cruda	Primario	Secundario	Filtrac.	Adsorción (Carb. Activ)	Osmosis Inversa	Efluente Final	Promedio Pozos	NOM
Ph	7.88	-	-	-	-	-	-	-	6.5-8.5
Color(Pt/Co)	304	304	190	118.75	29.6975	7.4218	7.4218	-	20
Olor	-	-	-	-	agrad.	-	agrad.	-	Agrad.
Sabor	-	-	-	-	agrad.	-	Agrad.	-	Agrad.
Turbidez (UTN)	106	66.25	16.5625	4.1406	1.0351	0.2588	0.2588	-	5
Conduct. Elect.	2052	-	-	-	-	-	-	-	-
Alcal. Total	618	-	386.25	96.5625	-	-	96.5625	-	-
Dureza Total	252	252	-	-	-	-	-	-	500
DBO	219	129.6	12.96	-	4.212	0.2106	0.2106	-	-
DQO	576	345.6	60.48	-	19.656	0.9828	0.9828	-	-
ST	1718	1460.3	-	-	-	-	-	247.26	-
SST	252	126	22.05	6.615	2.31525	0.5788	0.5788	-	-
Ssed	2.06	0.1	-	-	-	-	-	-	-
SDT	1447	-	-	-	-	115.76	115.76	-	1000
N-NH	22	19.25	4.8125	3.0078	1.87988	0.46997	0.46997	0.096	0.5
N-NO	0.37	-	-	-	0.32375	0.06475	0.06475	-	10
N-NO	0.06	0.06	-	-	-	-	-	-	0.05
P-PO	28	-	2.1	-	-	0.042	0.042	-	-
Cloruros	276	276	-	-	-	-	-	19.92	250

TRANS CON  
 FALTA DE OFICINA



**TABLA 2 (Continuación)**

**ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO I**  
**CALIDAD ESPERADA DEL EFLUENTE DE ACUERDO CON LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN**

PARAMETRO	Agua Cruda	Primario	Secundario	Filtrac.	Adsorción (Carb. Activ)	Osmosis Inversa	Efluente Final	Promedio Pozos	NOM
B	2.06	-	-	-	-	-	-	-	-
SO	105	-	-	-	-	-	-	43.66	400
Na	345	-	-	-	-	-	-	27.96	200
Fe	4.24	2.65	-	0.1656	0.0414	-	0.0414	0.052	0.3
Mn	0.1763	0.15426	0.6625	0.0241	0.01506	0.00376	0.00376	0.02	0.15
K	49	-	0.09641	-	-	0.0004	0.0004	14.5	-
Pb	0.0866	-	-	-	-	-	0.018	-	0.025
Cd	0.0084	-	0.018	-	0.0000735	$4.04 \cdot 10^{-5}$	$4.04 \cdot 10^{-5}$	-	0.005
Hg	0.0017	-	0.000084	-	0.000126	0.00005	0.00005	-	0.001
As	0.0056	-	0.00063	-	-	0.00016	0.00016	-	0.05
Cr	0.0445	-	0.00182	-	0.00707	0.00032	0.00032	-	0.05
Zn	0.4197	-	0.01179	-	0.04929	0.000986	0.000986	-	5
Cu	0.1119	-	0.16998	-	0.01209	0.001148	0.001148	-	2
Se	0.0012	0.00105	0.02518	0.0023	$2.01 \cdot 10^{-5}$	$38.19 \cdot 10^{-5}$	$38.19 \cdot 10^{-5}$	-	-
CO	32	-	0.0009187	-	-	-	-	-	-
Fe	-	-	-	-	-	-	-	-	1.5
Ce	129	-	-	-	-	-	-	12.34	-
Al	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2
Ba	-	-	-	-	-	-	-	-	0.7
CN	-	-	-	-	-	-	-	-	0.07

TESIS CON FALTA DE ORIGEN



TABLA 2 (Continuación)

ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO 1  
 CALIDAD ESPERADA DEL EFLUENTE DE ACUERDO CON LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN

PARAMETRO	Agua Cruda	Primario	Secundario	Filtrac.	Adsorción (Carb. Activ)	Osmosis Inversa	Desinfec.	Efluente Final	Promedio Pozos	NOM
CO <sub>2</sub> res	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2-1.5
THM s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2
SAAM	14	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5
Coef. Fecales	2.2*10 <sup>6</sup>	-	5.5*10 <sup>6</sup>	1.37*10 <sup>6</sup>	-	-	6.875*10 <sup>3</sup>	6.875*10 <sup>3</sup>	-	No detec.
Coef. Totales	8.6*10 <sup>6</sup>	-	21.5*10 <sup>6</sup>	5.37*10 <sup>6</sup>	-	-	26.87*10 <sup>3</sup>	26.87*10 <sup>3</sup>	-	2NMP/100mL
Plaguicidas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03Mg/L
Cordano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3
DDT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Lindano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Fenoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.001
HCB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01
Heptacloro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03
Metocloro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20
2,4-D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



TABLA 3

ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO 2  
 CALIDAD ESPERADA DEL EFLUENTE DE ACUERDO CON LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN

PARAMETRO	Agua Cruda	Primario	Secundario	Coa./Floc.	Filtración	Adsorción	Efluente Final	Promedio Pozos	NOM
pH	7.88	-	-	-	-	-	-	-	6.5-8.5
Color(PVCo)	304	304	190	-	118.75	29.6875	29.6875	-	20
Olor	-	-	-	-	-	Agrad.	Agrad.	-	agrad.
Sabor	-	-	-	-	-	Agrad.	Agrad.	-	agrad.
Turbidez (UTN)	106	66.25	16.5625	4.1406	1.0351	0.2588	0.2588	-	5
Conduct. Elect.	2052	-	-	-	-	-	-	-	-
Alcal.Total	618	-	386.25	241.4062	60.3516	-	60.3516	-	-
Dureza Total	252	-	-	-	-	-	-	-	500
DBOT	219	129.6	12.96	5.832	-	1.8954	1.8954	-	-
DQO	576	345.6	60.48	27.216	-	8.8452	8.8452	-	-
ST	1718	1460.3	-	-	-	-	-	247.26	-
SST	252	126	22.05	7.7175	2.31525	0.8103	0.8103	-	-
Ssed	2.06	0.1	-	-	-	-	-	-	-
SDT	1447	-	-	-	-	-	-	-	1000
N-NH3	22	19.25	4.8125	4.2109	2.6318	1.6449	1.6449	0.096	0.5
N-NO3	0.37	-	-	0.32375	-	0.28328	0.28328	-	10
N-NO2	0.06	0.06	-	-	-	-	-	-	0.05
P-PO4	28	-	2.1	-	-	-	2.1	-	-
Cloruro	276	276	-	-	-	-	-	19.92	250

TESTES CON FALLA DE ORIGEN



**TABLA 3 (Continuación)**

**ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO 2**  
**CALIDAD ESPERADA DEL EFLENTE DE ACUERDO CON LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN**

PARAMETRO	Agua Cruda	Primario	Secundario	Coa./Floc.	Filtración	Adsorción	Efluente Final	Promedio Pozos	NOM
B	2.06	-	-	-	-	-	-	-	-
SO <sub>4</sub>	105	-	-	-	-	-	-	43.66	400
Na	345	-	-	-	-	-	-	27.96	200
Fe	4.24	2.65	0.6625	0.1656	0.0414	0.01035	0.01035	0.052	0.3
Mn	0.1763	0.15426	0.09641	0.0602	0.01505	0.0094	0.0094	0.02	0.15
K	49	-	-	-	-	-	-	14.5	-
Pb	0.0866	-	0.018	0.0034	-	-	0.0034	-	0.025
Cd	0.0084	-	0.000084	6.72*10 <sup>-6</sup>	-	5.88*10 <sup>-6</sup>	5.88*10 <sup>-6</sup>	-	0.005
Hg	0.0017	-	0.00063	25.2*10 <sup>-6</sup>	-	5.04*10 <sup>-6</sup>	5.04*10 <sup>-6</sup>	-	0.001
As	0.0056	-	0.00182	18.2*10 <sup>-6</sup>	-	-	18.2*10 <sup>-6</sup>	-	0.05
Cr	0.0445	-	0.01179	0.0001179	-	70.7*10 <sup>-6</sup>	70.7*10 <sup>-6</sup>	-	0.05
Zn	0.4197	-	0.16998	0.0221	-	0.0064	0.0064	-	5
Cu	0.1119	-	0.02518	0.0151	-	0.0072	0.0072	-	2
Se	0.0012	0.00105	0.00092	8.04*10 <sup>-4</sup>	2.01*10 <sup>-4</sup>	1.76*10 <sup>-4</sup>	1.76*10 <sup>-4</sup>	-	-
CO <sub>3</sub>	32	-	-	-	-	-	-	-	-
F	-	-	-	-	-	-	-	-	1.5
Ca	129	-	-	-	-	-	-	12.34	-
Al	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2
Ba	-	-	-	-	-	-	-	-	0.7
CN	-	-	-	-	-	-	-	-	0.07

TRATADO CON  
**FALLA DE ORIGEN**



TABLA 3 (Continuación)

ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO 2  
 CALIDAD ESPERADA DEL EFLUENTE DE ACUERDO CON LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN

PARAMETRO	Agua Cruda	Primario	Secundario	Coa/Floc	Adsorción	Desinfec.	Efluente Final	Efluente Final	Promedio Pozos	NOM
Ctz. res	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2-1.5
THM s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2
SAAM	14	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5
Colif. Fecales	$2.2 \cdot 10^7$	-	$5.5 \cdot 10^6$	$1.37 \cdot 10^6$	$6.875 \cdot 10^3$	34	34	34	-	No detec.
Colif. Totales	$8.6 \cdot 10^7$	-	$21.5 \cdot 10^6$	$5.37 \cdot 10^6$	$26.87 \cdot 10^3$	134	134	134	-	2NMP/100mL
Plaguicidas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03mg/L
Clordano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3
DDT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Lindano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Fenoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.001
HCB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01
Heptacloro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03
Metocloro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20
2,4-D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARAGON  
INGENIERIA CIVIL



127

**TABLA 4**

**NORMAS DE CALIDAD DEL AGUA RENOVADA PARA REHUSO**

DESDE CON FALLA DE ORIGEN

PARAMETROS	RECARGA DE ACUIFEROS		RIEGO DE ÁREAS VERDES	USO AGRICOLA		USOS RECREATIVOS		INDUSTRIA ENFRIAMIENTO
	POR INYECCION	POR INFILTRAC		PRODUC. CRUDOS	PRODUC. COCIDOS	CON CONTACTO	SIN CONTACTO	
pH	7-9	7-9	6-9	7-8	7-8	6.5	8.3	5-8.3
OLOR	3	3	3	3	3	3	3	3
COLOR	5	75	60	60	60	15	40	60
TURBIDEZ	5	20	20	10	20	10	15	10
ALCALINIDAD	500	500	500	500	500	500	500	300
DUREZA TOT.	500	625	625	625	500	625	625	325
DUREZA CALCIO	400	375	375	375	250	375	375	75
DUREZA MANESIO	125	250	250	250	250	250	250	250
SOLIDOS TOT.	500	800	1200	2000	2000	2000	2500	1700
SOL.DIS.TOT.	500	800	1200	2000	2000	2000	2000	1200
SOL.DIS.FLIOS	490	790	1190	1190	1190	1190	1190	1190
SOL.DIS.VOLATILES	10	10	10	10	10	10	10	10
SOL.SUSPEND.TOT.	2	10	15	100	100	10	500	500
SOL.SUSPEND.FLIOS	1	5	10	75	75	5	400	400
SOL.SUSP.VOLATILES	1	5	5	25	25	5	100	100
CONDUCTIVIDAD	900	1500	2000	3500	3500	3500	3500	2000



TABLA 4 (Continuación)

NORMAS DE CALIDAD DEL AGUA RENOVADA PARA REHUSO

PARAMETROS	RECARGA DE ACUIFEROS		RIEGO DE ÁREAS VERDES	USO AGRICOLA		USOS RECREATIVOS		INDUSTRIA ENFRIAMIENTO
	POR INYECCION	POR INFILTRACION		PRODUC. CRUDOS	PRODUC. COCIDOS	CON CONTACTO	SIN CONTACTO	
DBO	2.5	5	20	20	50	20	100	20
DOO	4	15	35	35	90	30	100	75
P-F04	0.9	0.9	4.5	4.5	4.5	0.9	0.9	0.9
P-TOTAL	1	1	5	5	5	1	1	1
PM TOTAL	3	3	15	15	15	3	3	3
N-NH3	0.5	0.5	15	15	15	0.5	5	0.5
NTK	1	1	30	30	30	10	10	1
N-NO3	10	10	30	10	10	10	90	30
N-PROTEICO	0.5	0.5	1	0.5	0.5	0.5	1	0.5
N-NO2	1	1	10	10	10	1	10	10
SAAM	0.5	0.5	1	0.5	0.5	0.5	1	0.5
GRASAS Y ACEITES	0	0	V.L.	V.L.	V.L.	V.L.	V.L.	V.L.
Na	100	100	250	250	250	250	250	500
K	100	100	250	250	250	250	250	250
Fe	0.3	0.3	5	5	5	0.3	0.3	0.5
Mn	0.05	0.05	0.2	0.2	0.2	0.05	0.2	0.5

TESIS CON  
 FOLIO DE ORIGEN  
 NOO SISLA



**TABLA 4 (Continuación)**

**NORMAS DE CALIDAD DEL AGUA RENOVADA PARA REHUSO**

PARAMETROS	RECARGA DE ACUIFEROS		RIEGO DE ÁREAS VERDES	USO AGRICOLA		USOS RECREATIVOS		INDUSTRIA ENFRIAMIENTO
	POR INYECCION	POR INFILTRAC		PRODUC. CRUDOS	PRODUC. COCIDOS	CON CONTACTO	SIN CONTACTO	
Ba	1	2	1	1	1	1	1	1
B	5	5	1	1	1	1	5	5
Al	0.2	0.2	5	5	5	0.2	5	1
Cd	0.01	0.75	0.01	0.01	0.01	0.01	0.75	0.75
Cu	1	1	0.5	0.2	0.2	0.2	1	0.5
Aq	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1	0.05	0.1	0.2
Hg	0.002	0.002	0.02	0.002	0.002	0.002	0.02	0.02
Pb	0.05	0.05	5	5	5	5	5	5
C HEXAVALENTE	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1
Zn	5	10	2	2	2	2	2	25
Se	0.01	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
Sb	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Ag	0.05	0.05	0.05	0.03	0.05	0.05	0.03	0.03
Ni	0.05	0.05	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
U	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TABLA 4 (Continuación)

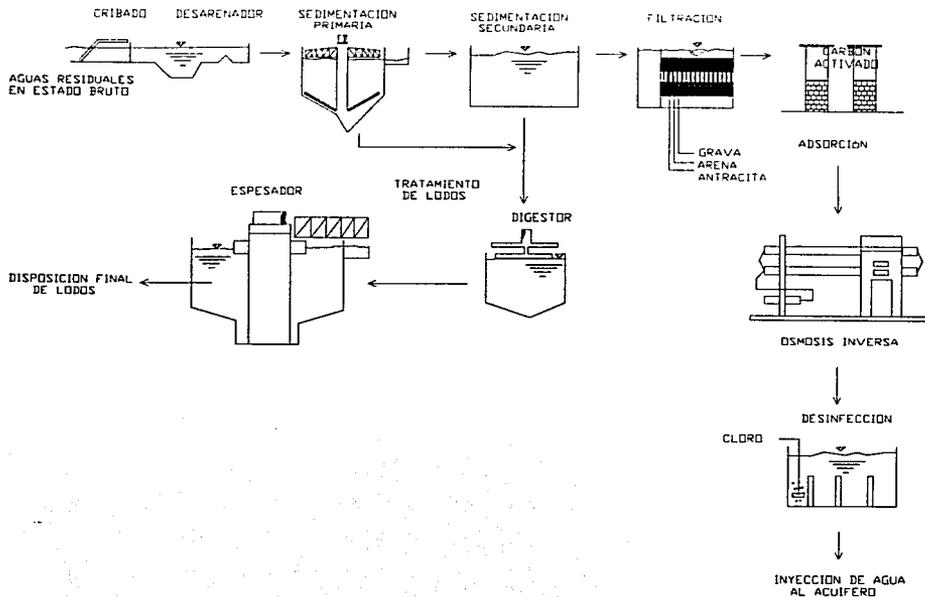
NORMAS DE CALIDAD DEL AGUA RENOVADA PARA REHUSO

PARAMETROS	RECARGA DE ACUIFEROS		RIEGO DE ÁREAS VERDES	USO AGRICOLA		USOS RECREATIVOS		INDUSTRIA ENFRIAMIENTO
	POR INYECCION	POR INFILTRAC		PRODUC. CRUDOS	PRODUC. COCIDOS	CON CONTACTO	SIN CONTACTO	
CIANUROS	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
SULFATOS	0.05	0.05	1	2	2	0.05	1	1
CLORUROS	250	250	500	500	500	250	600	600
FLORUROS	1.5	1.5	2	1	1	1	2	1
SULFUROS	250	250	400	250	250	250	400	700
NITRATOS	30	30	90	30	30	30	270	90
RAS SOLUBLE	6	6	18	18	18	18	18	6
COLIFORMES	1000	20000	1000	1000	10000	1000	5000	10000
CUENTA ESTANDAR	200	4000	200	200	2000	200	1000	2000
MICROORGANISMOS	10	200	10	10	100	10	30	100
QUISTES Y HUEVOS	0	0	2	1	1	1	4	2
CLORO LIBRE	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	2	0.2	0.2
OCMA	3	3	3	3	3	3	10	10
EXT.CARBON-CLOROF	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	1	1
EXT.CARBON-ALCOHO	1.5	1.5	2.5	1.5	1.5	2.5	5	3
OXIBILIDAD	1	1	1.7	1	1	1.7	3.3	3.3

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



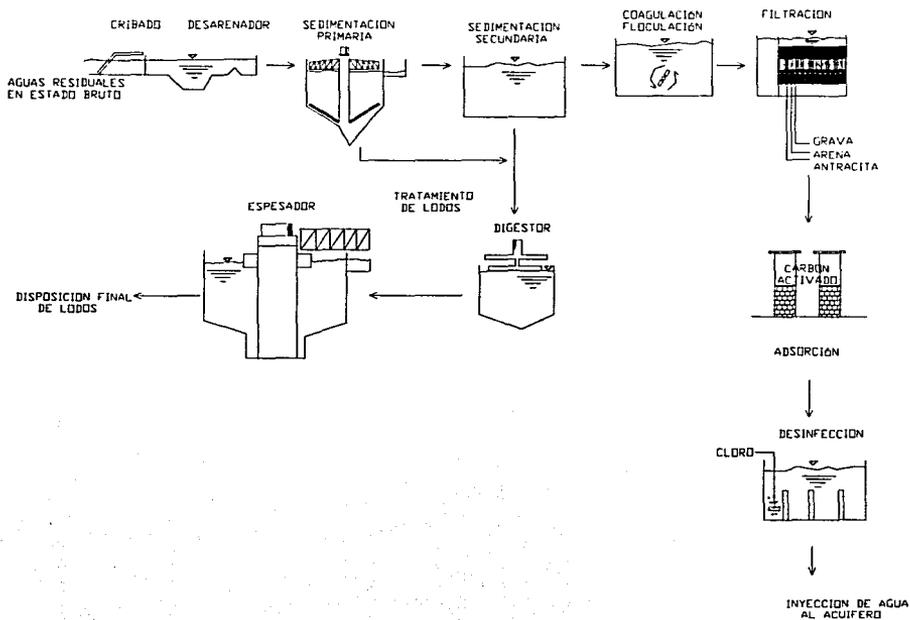
ESQUEMA PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE AGUA RESIDUAL PARA LA RECARGA DEL ACUIFERO (I)



TESIS CON  
FALTA DE ORIGEN



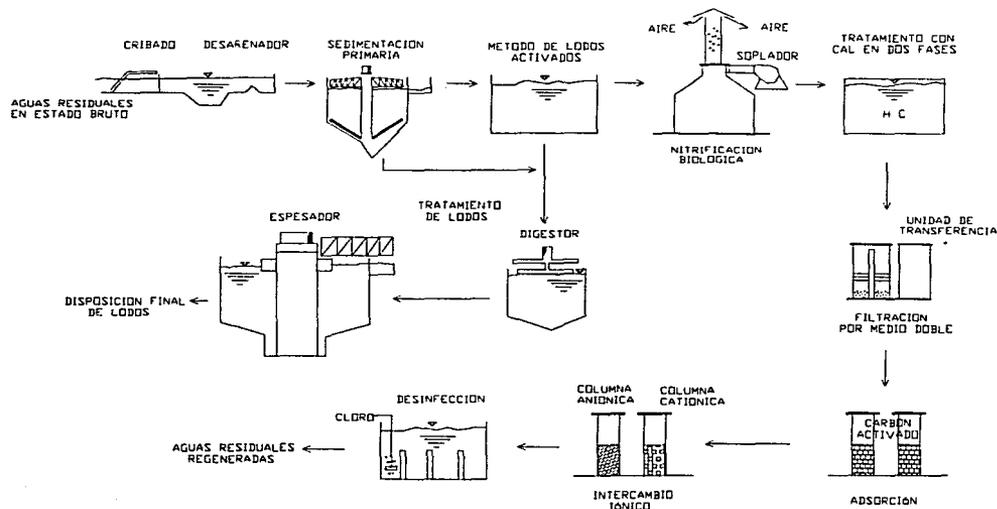
ESQUEMA PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE AGUA RESIDUAL PARA LA RECARGA DEL ACUIFERO (2)



TRABAJOS CON  
FOLIOS DE ORIGEN



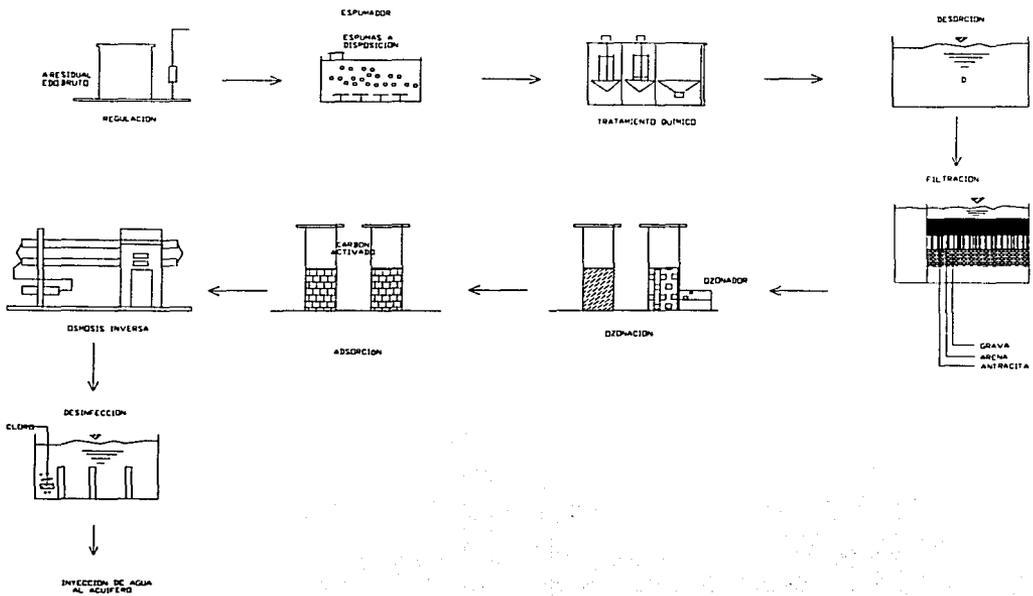
ESQUEMA PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE AGUA RESIDUAL PARA LA RECARGA DEL ACUIFERO (3)



TRABAJOS CON  
FALTA DE ORIGEN



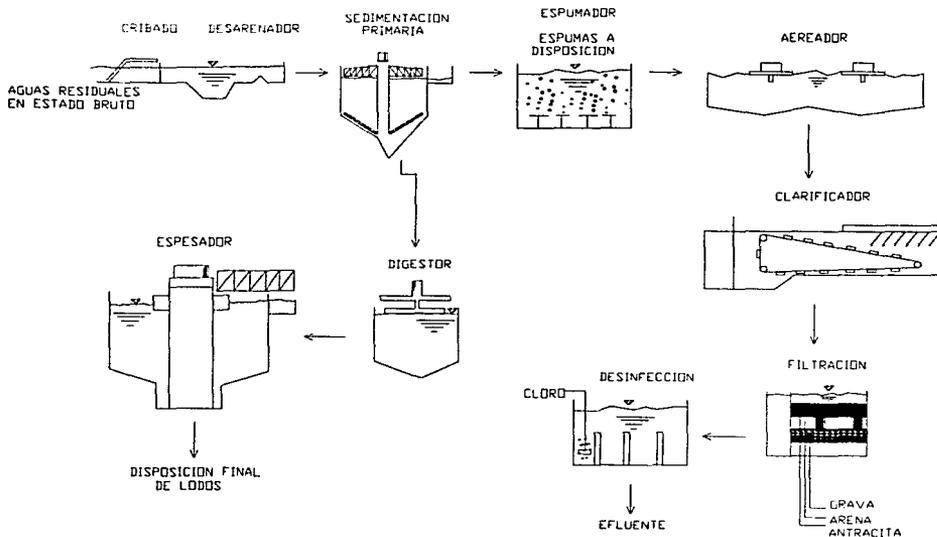
ESQUEMA PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE AGUA RESIDUAL PARA LA RECARGA DEL ACUIFERO (4)



TIENES CON FALLA DE ORIGEN



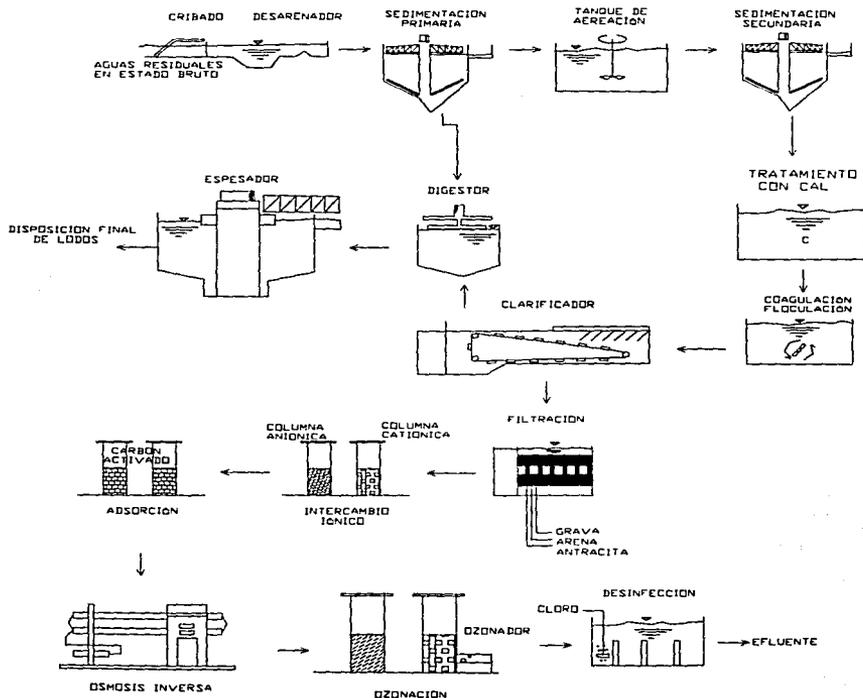
ESQUEMA PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE AGUA RESIDUAL PARA LA RECARGA DEL ACUIFERO (5)



TRABAJO CON  
FALTA DE ORIGEN



ESQUEMA PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE AGUA RESIDUAL PARA LA RECARGA DEL ACUIFERO (6)



INGRESO CON  
FALLA DE ORIGEN