

24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

PROPUESTA DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUIFEROS EN EL ESTADO DE TLAXCALA CON AGUA RESIDUAL TRATADA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

ERICK MENDIETA PAEZ



DIRECTOR DE TESIS: DRA ROSARIO ITURBE ARGUELLES

CD. UNIVERSITARIA, MEXICO, D. F.,

1999

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

1999/06/27



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/133/98

Señor
ERICK MENDIETA PAEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora **DRA. ROSARIO ITURBE ARGÜELLES**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

**"PROPUESTA DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUIFEROS EN EL ESTADO DE
TLAXCALA CON AGUA RESIDUAL TRATADA"**

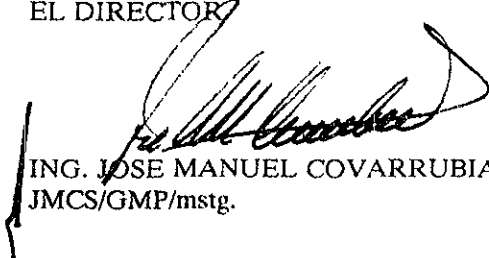
INTRODUCCION

- I. RECARGA ARTIFICIAL DE ACUIFEROS**
 - II. MARCO LEGAL SOBRE LA RECARGA DE ACUIFEROS EN MEXICO**
 - III. APLICACION DE RECARGA ARTIFICIAL EN EL ESTADO DE TLAJCALA**
 - IV. PROPUESTA DE DISEÑO DEL METODO DE RECARGA**
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
BIBLIOGRAFIA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 18 de septiembre de 1998
EL DIRECTOR



ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS
JMCS/GMP/mstg.

“ El agua también merece vivir ”

Erick Mendieta Páez

DEDICATORIA

Dios, gracias por todo.

Papá, Mamá este trabajo se los brindo a ustedes porque es el fruto de sus valiosos consejos, estoy muy orgulloso de su labor como padres.
Gracias por todo, los amo.

A Fernando, gracias por dedicarme tantas horas de estudio esto también te lo debo a ti. Siempre seguiré tu ejemplo.

Aldo, tu apoyo ha sido muy importante para mi. Estoy seguro de que tu lo harás mejor sigue adelante.

A mis familias Mendieta y Páez, porque con sus valores y ejemplos me han enseñado a salir adelante.

A mi novia Claudia, que con su amor ha llenado mi vida. Esto solo es el principio de nuestros sueños, Te Amo.

AGRADECIMIENTOS

A la Doctora Rosario Iturbe Argüelles, por su apoyo y asesoría brindada a lo largo del presente trabajo. Gracias por sembrar el conocimiento en mi.

A mis amigos del Instituto de Ingeniería por su amistad y apoyo otorgado,
saben que cuentan conmigo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, nunca voy a olvidar el día en que me permitiste ser parte de ti.

A mi casa la Facultad de Ingeniería, por regalarme el conocimiento e inculcarme valores éticos.

A mis compañeros de la empresa EFE Asesores por ser parte de mi desarrollo profesional.

Muy en especial al Estado de Tlaxcala, espero que este trabajo sea de gran utilidad para su desarrollo.

INDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes	1
1.1.1	Recursos hidráulicos en México.	6
1.1.2	Aspectos generales del estado de Tlaxcala.	7
1.1.3	Necesidad de la recarga artificial en el País.	9
1.2	Objetivo	10
1.3	Alcances	10
II.	RECARGA ARTIFICIAL	11
2.1	Introducción	11
2.1.1	Definición	15
2.2	Métodos de recarga artificial	16
2.2.1	Objetivos de la recarga	17
2.2.2	Métodos superficiales directos	18
2.2.2.1	Inundación	19
2.2.2.2	Zanjas y surcos	20
2.2.2.3	Estanques o balsas de infiltración	21
2.2.2.4	Modificación de corrientes	22
2.2.2.5	Sobreirrigación	24
2.2.3	Métodos subsuperficiales directos	25
2.2.3.1	Aprovechamiento de aberturas naturales	26
2.2.3.2	Fosas y Tiros	26
2.2.3.3	Pozos	27
2.2.4	Recarga por combinación superficial-subsuperficial	30
2.2.5	Métodos indirectos	32
2.2.5.1	Recarga inducida por fuentes de agua superficiales	32
2.2.5.2	Modificación de acuíferos	32
III.	MARCO LEGAL SOBRE LA RECARGA DE ACUIFEROS EN MEXICO	34
3.1	Legislación en cuanto al uso y calidad del agua	34
3.2	Generalidades sobre la legislación de recarga de acuíferos	44

3.3	Selección del método de recarga	45
3.4	Características del agua de recarga	46
	3.4.1 Calidad del agua de recarga empleando métodos superficiales	49
	3.4.2 Calidad del agua de recarga empleando pozos de inyección	50
IV.	APLICACIÓN DE RECARGA ARTIFICIAL EN EL ESTADO DE TLAXCALA	52
4.1	Disponibilidad y calidad del agua de recarga	53
	4.1.1 Selección de la planta de tratamiento	55
	4.1.2 Caracterización	56
	4.1.3 Planta de tratamiento seleccionada	61
	4.1.4 Características del sitio	65
	4.1.5 Características geohidrológicas del estado de Tlaxcala	73
4.2	Calidad del agua subterránea	76
4.3	Remoción de contaminantes a través del suelo	82
	4.3.1 Mejoramiento de la calidad del agua residual destinada para la recarga	90
4.4	Método de recarga seleccionado	92
V.	PROPUESTA DE DISEÑO DEL METODO DE RECARGA	93
5.1	Aspectos hidráulicos de la recarga artificial	93
5.2	Teoría para el diseño de la obra de recarga	98
5.3	Diseño de la obra de recarga	102
	5.3.1 Memoria de cálculo	104
5.4	Fases de la recarga artificial	111
5.5	Construcción y mantenimiento de las balsas de infiltración	114
VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	119

ANEXOS**BIBLIOGRAFÍA**

almacena en el subsuelo puede ser capaz de agotarse lo cual se puede comprender mejor cuando se analizan sus dos componentes, uno que representa el volumen de agua que ingresa en forma de recarga y otro mucho mayor constituido por el agua que se ha acumulado a lo largo de los siglos y que conforma los recursos hídricos no renovables, que pueden ser usados solo una vez, pues si son agotados no hay más agua que explotar en el acuífero. El agua subterránea es un recurso escondido cuyo conocimiento y utilización requiere de métodos científicos avanzados por lo que en esta materia la investigación científica y tecnológica tienen mucho que aportar.

Gran parte de los centros de población más importantes se ubican en donde el agua superficial no es abundante, por el contrario este recurso es limitado y es necesario extraerlo del subsuelo. En las zonas áridas es donde se presenta la mayor parte de la explotación del agua subterránea. En esta zona la recarga natural es muy baja y en general se tiene un balance hidráulico negativo que ocasiona el abatimiento de los almacenamientos subterráneos (**Mesas Redondas Sobre Metrología, 1989**).

De acuerdo con las distribuciones espaciales de lluvia y temperatura, aproximadamente el 52.7 por ciento del territorio nacional comprendido por climas desérticos, áridos y semiáridos, están bajo déficit hídrico; mientras que el 47.3 por ciento es subhúmedo y húmedo (**Echeverría, 1995**).

En zonas de riego por bombeo, los niveles de agua subterránea han descendido varias decenas de metros respecto a su posición natural y continúan bajando a un ritmo hasta de 3 m/año; así mismo los pozos agrícolas operan con niveles dinámicos entre los 70 y 100 m de profundidad, lo que ocasiona un costo elevado, tanto de operación como de mantenimiento.

El acelerado descenso de los niveles del agua subterránea ha provocado diversos efectos perjudiciales; de los 600 acuíferos identificados dentro del territorio nacional, de los cuales 115 están sobreexplotados; 80 de ellos se sobreexplotan poco más del 20 por ciento, ello repercute en una disminución anual hasta de

11 km³ de la reserva no renovable. Se dice que la sobreexplotación se produce en un acuífero, cuando de él se extraen volúmenes que superan el componente renovable (recarga) del agua subterránea.

Aún existen cuencas que ofrecen escurrimientos excedentes de magnitud importante, pero para transferirlos a las cuencas donde se les requiere, es necesario construir grandes obras, las cuales resultan, desde el punto de vista económico, poco viables. Es muy probable que en algunas regiones existan acuíferos de profundidad considerable que por el momento no han sido explotados y su aprovechamiento solo podría lograrse mediante captaciones costosas.

Se estima que la *recarga natural* de los acuíferos es del orden de $40\,000 \times 10^6 \text{ m}^3$ en promedio anual, esta cantidad es aportada principalmente por la infiltración del agua de lluvia y de los escurrimientos superficiales; la *recarga inducida* por las actividades antropogénicas, se estima del orden de $15\,000 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$, procedente de la infiltración de excedentes de riego, pérdidas por conducción en las redes de distribución y del ingreso al subsuelo de aguas residuales. Por lo que la recarga total de los acuíferos resulta ser de $55\,000 \times 10^6 \text{ m}^3$, como mínimo, en promedio anual, figura 1.1.

VOLÚMENES PROMEDIO DE LA EXTRACCIÓN Y RECARGA DEL AGUA EN MEXICO

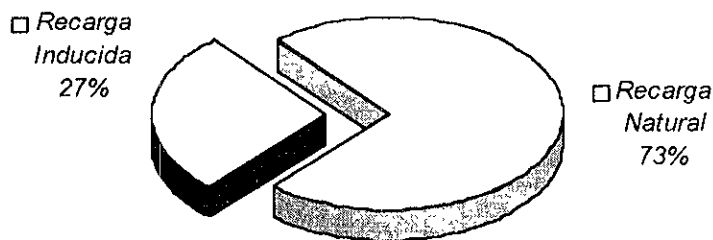


Figura 1.1

Las cifras anteriores indican que el balance hidráulico de los acuíferos es positivo a nivel nacional, pues la cantidad de agua extraída de ellos equivale al 70 por ciento de su recarga natural y apenas al 50 por ciento de su recarga total (**Heredia, 1997**). Pero este balance no refleja la crítica situación que prevalece en vastas regiones del territorio nacional. En efecto, la mayor parte de la explotación tiene lugar en las zonas áridas del país, donde la renovación del recurso es muy lenta y en ocasiones escasa, aquí se presenta un balance hidráulico negativo y el almacenamiento de agua subterránea se agota gradualmente.

La corteza terrestre almacena reservas de agua dulce y debajo de los acuíferos someros, hasta ahora explotados, se encuentran gigantescos mantos prácticamente vírgenes. Si bien es cierto que en los primeros 300 m de profundidad, a partir de la superficie del terreno, el subsuelo de México almacena un volumen de agua del orden de $5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ y que las exploraciones han revelado la existencia de acuíferos regionales que se extienden bajo dos o más cuencas hidrográficas, estas cifras parecen alentadoras pero desafortunadamente no es factible garantizar que estos acuíferos ofrezcan agua en cantidad y calidad adecuada, en costo accesible y con la distribución geográfica necesaria para cubrir el déficit actual de los acuíferos sobreexplotados y satisfacer el incremento de las demandas a largo plazo.

La explotación desmedida de los almacenamientos subterráneos provoca efectos negativos en la naturaleza, obras civiles, pérdidas económicas y afectaciones a la población. A continuación se mencionan los efectos que se presentan con mayor frecuencia (**Mesas Redondas Sobre Metrología, 1989**):

- * El descenso de los niveles piezométricos provoca que las tuberías y las bombas se tengan que profundizar, teniendo que vencer cargas mayores, lo que conduce a consumos de combustible o energía eléctrica mayores, obligando a incrementar los costos de bombeo.

-
- * El exceso de bombeo para extracción en las zonas costeras, produce un fenómeno llamado intrusión salina, debido al abatimiento de la frontera entre la zona de agua dulce y la salina

 - * En algunas zonas donde los acuíferos son confinados o semiconfinados, la sobreexplotación provoca el asentamiento del terreno con sus consecuentes afectaciones a las obras civiles.

Tal es el caso de la Ciudad de México, donde el periodo más crítico de hundimiento se sufrió a mediados del presente siglo; entre 1950 y 1980 la zona central se hundió cinco metros, para el periodo de 1983 a 1992 hubo hundimientos anuales alrededor del aeropuerto internacional de entre 15 y 25 cm; de diez en el Centro Histórico, de entre 10 y 15 cm en Xochimilco y Tlahuac. Actualmente, la situación no ha variado pues el hundimiento medio anual en el centro histórico es de 10 cm, en Xochimilco de 15, y de 20 a 25 en el aeropuerto internacional, el mayor hundimiento se presenta en Ciudad Nezahualcóyotl alcanzando valores de 30 cm (**Legorreta, 1997**).

- * Otro efecto nocivo es la migración o mezcla de aguas de mala calidad, que antes de la sobreexplotación se encontraban en los niveles inferiores del acuífero; en algunos casos genera graves problemas, pues incorpora elementos tóxicos como el arsénico a las aguas destinadas para el consumo humano.

- * La reducción de la producción agrícola por agotamiento de los recursos hídricos y edafológicos, es otro efecto que además tiene incidencia directa en aspectos económicos y sociales.

- * La pérdida en las obras (pozos), debido a que el nivel piezométrico ha descendido a tal nivel que estas quedan secas, o bien porque el agua que extraen no es utilizable por su alta salinidad.
- * El deterioro de los ecosistemas juega un papel muy importante, como por ejemplo la desecación de humedales, y en el peor de los casos promover la desertificación.

La sobreexplotación es en muchos casos un proceso inevitable y necesario, pero puede y debe ser planificada para evitar en lo posible los problemas citados. Este problema puede disminuir con la recarga de acuíferos para lo cual se tienen métodos para incrementar la recarga natural o la artificial.

1.1.1 Recursos hidráulicos en México.

Disponibilidad

Dada la gran diversidad de climas y ecosistemas presentes en el país, la distribución del agua en cuanto al tiempo y espacio es muy peculiar. En México se precipitan en promedio 777 mm/año que equivalen a 1 522 km³. El 27 por ciento (410 km³) escurre en la superficie de 314 cuencas hidrológicas, otra parte se infiltra (48 km³) para recargar acuíferos; 218 cuencas, equivalen al 78 por ciento del territorio nacional, en el cual se asienta el 93 por ciento de la población total del país, el 72 por ciento de la producción industrial y el 98 por ciento de la superficie de riego.

Agua subterránea

El agua subterránea en México ha jugado un papel muy importante en el desarrollo socioeconómico del país; al inicio de los años 90's se garantizó el riego de dos millones de hectáreas de tierra, aproximadamente la tercera parte de la superficie total destinada para riego, mientras que unos 55 millones de habitantes concentrados principalmente en los grandes centros urbanos se vieron

beneficiados con agua potable. La gran mayoría de los polos industriales del norte y centro del país abastecen sus recursos hídricos por medios subterráneos.

Actualmente se tiene conocimiento de la existencia de más de 130 000 pozos con capacidad de extracción significativa, de los cuales 80 000 son de uso agrícola y unos 15 000 destinados para uso urbano (doméstico y abrevadero). Las extracciones de agua subterránea, solo se cuantifican en algunos polos de desarrollo industrial y núcleos urbanos utilizando medidores totalizadores instalados en la descarga de pozos. El agua subterránea con fines agrícolas difícilmente es aforada, por lo que la extracción es estimada de manera indirecta. La descarga natural de los acuíferos a través de manantiales, no es medida en forma sistemática, sólo se dispone de estimaciones basadas en aforos esporádicos.

A nivel nacional, el recurso subterráneo tiene una estimación aproximada de $24190 \times 10^6 \text{ m}^3$, esta cifra es el resultado de la suma aritmética de los totales de cada estado, en algunos casos se presentan valores negativos, principalmente de los estados situados en zonas áridas y semiárida (Heredía, 1997).

1.1.2 Aspectos generales del estado de Tlaxcala

Situado en el centro de la República, el Estado de Tlaxcala se encuentra aproximadamente a 150 km de la capital mexicana, encontrándose entre los $97^{\circ}37'07''$ y los $98^{\circ}42'51''$ longitud occidental y entre los $19^{\circ}05'43''$ y los $19^{\circ}44'07''$ latitud norte, quedando dentro del Cinturón Transversal Neovolcánico. El Estado limita en el occidente con el Estado de México, al norte con Hidalgo, al noroeste, este y sur colindado con el Estado de Puebla (INEGI y SPP, 1982).

Tlaxcala es el Estado más pequeño de la República mexicana, cuenta con una extensión territorial de $4\,031.79 \text{ km}^2$ y con una población total de 883 924 habitantes, distribuidos a su vez en 43 municipios (INEGI, 1997).

Por su situación geográfica, el clima del estado se caracteriza por una época de lluvias de medio año de duración con variación entre los meses de mayo y octubre, y una época de sequía o estiaje, entre noviembre y abril.

Hacia el norte del estado, existe una franja sumida que es seca, partiendo desde Apan, Hidalgo, pasando por Apizaco hasta el Carmen; en esta franja la temporada de lluvias dura aproximadamente 5 meses; mientras que en la zona Nevada, de la Malinche y la Sierra de Tlaxco se alarga 8 meses. Existen gradientes diferenciales de temperatura dependiendo de la situación geográfica, de la altura; y tomando en cuenta las condiciones morfológicas en las depresiones terrenales que no tienen desagüe natural; la cantidad de tierras que cuentan con cambios diarios de temperatura considerable, con heladas nocturnas que dañan la agricultura, localizándose al suroeste de Tlaxcala, equivalen a 50 días; en el Altiplano ascienden de 100 a 200 días, alcanzando en las partes altas de la Malinche y de la Sierra Nevada una magnitud de más de 300 días de heladas.

El clima húmedo cambiante, se refleja en las condiciones hidrográficas de Tlaxcala. Solamente el Río Atoyac y el Río Zahuapan reciben sus aguas de la Sierra Nevada y de la de Tlaxco respectivamente, esta agua es suficiente para mantener con agua los cauces en la época de sequía, cabe mencionar que estos ríos también desaguan gran parte del estado, es decir reciben aportaciones de las descargas del drenaje; fluyendo en dirección sur y llevando agua durante todo el año. Todas las corrientes acuíferas que incorporan en sus caudales las aguas superficiales, se agotan y desaparecen en la época de sequía. Este fenómeno se explica en primer lugar, en el alto índice de infiltración de agua en los fluvisoles arenosos, que se localizan al pie de las laderas montañosas, y en segundo lugar, al alto índice de evaporación de la misma, y, por último, la explotación excesiva de acuíferos ocasionada por el hombre (Werner, 1992).

1.1.3 Necesidad de la recarga artificial en el País y en particular en Tlaxcala.

De acuerdo con las cifras presentadas en el apartado 1.1.1, referidas a los recursos hidráulicos disponibles en México, aparentemente no representan un problema de escasez considerable. Sin embargo, existen muchas entidades que presentan déficit de agua, situación que se agrava en las zonas áridas del país y en aquellas entidades donde la concentración de población es alta.

En el estado de Tlaxcala se presenta una explotación excesiva del agua subterránea la cual forma parte de la problemática del recurso hidráulico en el estado, a la fecha se tienen identificados dos acuíferos que presentan problemas de sobreexplotación, uno de ellos el acuífero *Atoyac-Zahuapan*, el segundo es el llamado acuífero *Huamantla*. Ambos acuíferos son los más importantes del estado; en el capítulo 4 se describen los detalles y la localización de los mismos.

Actualmente el abastecimiento del agua, en contraposición de la necesidad del mismo tanto para la agricultura y el consumo de la población, es un grave problema. En las últimas décadas, en el estado de Tlaxcala se han realizado una serie de programas especiales para atenuar el problema en cuestión, impulsando la construcción de depósitos de almacenamiento (presas y jagüeyes), perforación de pozos profundos, etc.

Lo anterior demuestra que la recarga artificial de acuíferos ofrece una alternativa viable para lograr una recuperación considerable de los recursos subterráneos, principalmente en aquellas regiones afectadas por la sobreexplotación.

1.2 OBJETIVO

Proponer el diseño de un sistema de recarga artificial de acuíferos en el estado de Tlaxcala con agua residual tratada.

1.3 ALCANCES

Selección del sitio para la ubicación del sistema de recarga.

Selección de la planta de tratamiento.

Obtener la calidad del efluente de las plantas de tratamiento.

Seleccionar el método de recarga idóneo a las características del sitio y de la calidad del agua residual.

Revisar la legislación nacional acerca de la recarga artificial de acuíferos.

Propuesta del diseño, operación y mantenimiento del sistema de recarga.

2

RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

2.1 Introducción

Las formaciones rocosas o de material poroso capaces de proporcionar agua en cantidades significativas se denominan acuíferos; la mayoría de los acuíferos se consideran grandes sistemas de almacenamiento de agua bajo tierra. De acuerdo con sus características litológicas los cuerpos de agua subterránea se clasifican en acuíferos, acuicludos, acuitardos y acuífugos, mismos que se describen a continuación, (**Custodio, 1976**).

Acuífero.

Del latín *aqua=agua* y *fero=llevar*, es aquel estrato o formación geológica que permite la explotación del agua debido a las posibilidades de circulación a través de sus poros o grietas.

Acuícludo.

Palabra proveniente del latín *claudere*=*encerrar o cerrar*, y se define como aquella formación geológica que contiene agua en su interior, incluso hasta la saturación, pero es incapaz de transmitirla y por lo tanto no es posible su explotación, por lo general se ubican en suelos arcillosos.

Acuitardo.

El tercero de estos términos (del latín *tardare*=*retardar*) se refiere a la existencia de numerosas formaciones geológicas que contienen apreciables cantidades de agua y la transmiten lentamente, por lo que tampoco son aptos para extraer sus aguas.

Acuífugo.

Del latín *fugere*=*huir*, son aquellas formaciones que no contienen agua ni la pueden transmitir, tal es el caso de los macizos rocosos de granito o rocas metamórficas.

A continuación se presenta la clasificación de acuíferos de acuerdo con la presión hidrostática del agua encerrada en los mismos.

Acuíferos libres, no confinados o freáticos.

Son aquellos que tienen como frontera superior el nivel freático y por lo tanto está en contacto directo con la zona no saturada y está a presión atmosférica. En la figura 2.1 se muestran ejemplos de acuíferos libres. En éstos, el nivel del agua coincide siempre con el nivel freático.

Acuíferos cautivos, confinados o a presión.

Son aquellos que tienen como frontera superior un acuitardo por lo que el agua de los mismos está a una presión mayor que la atmosférica. En estos casos los pozos muestran un ascenso rápido del nivel de agua hasta lograr su estabilización en un determinado nivel.

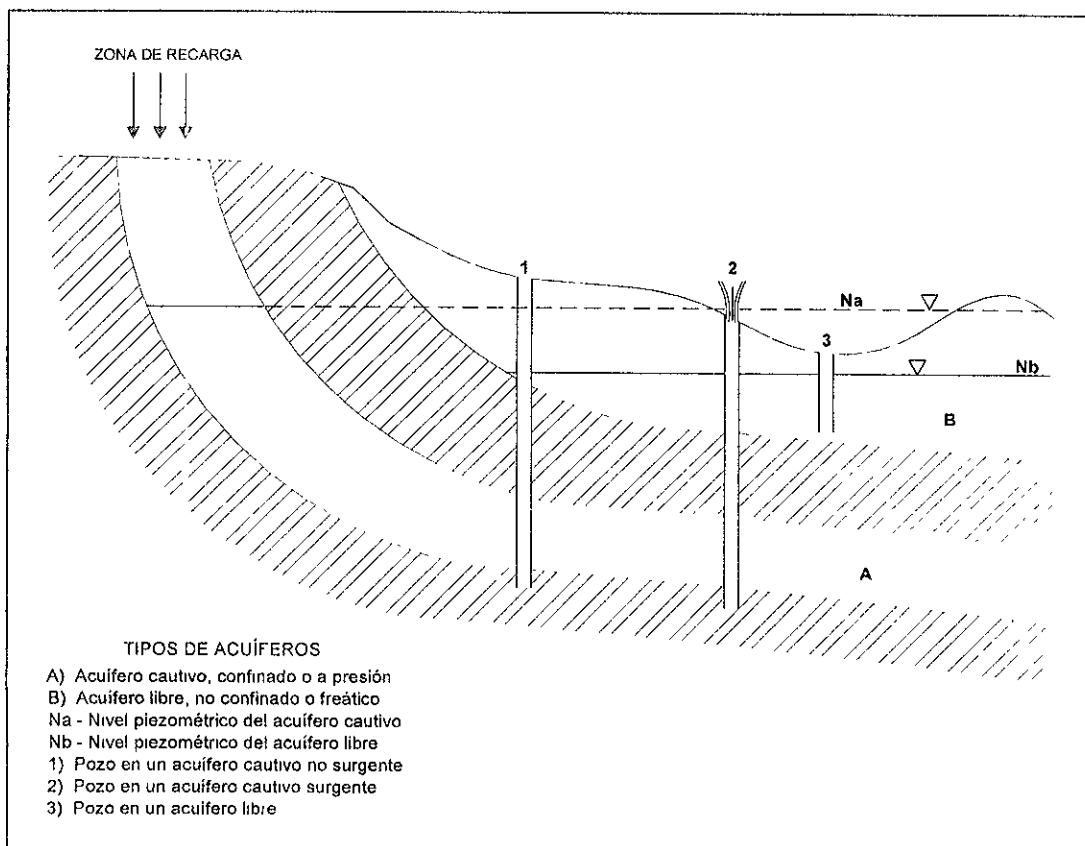


Figura 2.1 Tipos de acuíferos

Otra variedad de estos acuíferos la constituyen los acuíferos *semicautivos* o *semiconfinados*, que pueden considerarse como un caso particular de los acuíferos cautivos, en los que el muro (parte inferior) y/o el techo (parte superior) que los encierra no sea totalmente impermeable sino un acuitardo, es decir que permita una filtración vertical de agua muy lenta que alimente el acuífero principal

en cuestión, a partir de un acuífero o masa de agua situada encima o debajo del mismo.

Es lógico que este paso vertical de agua es solo posible cuando existe una diferencia de potenciales entre ambos acuíferos (el que recarga y el recargado) y puede hacerse en uno y en otro sentido.

Para explicar en qué consiste la recarga artificial así como sus características, es necesario distinguir la diferencia que existe entre recarga inducida y recarga artificial, a esta última también se les conoce como recarga planeada.

Recarga Inducida

Consiste en crear las condiciones más favorables para permitir la infiltración natural. Dentro de la recarga inducida existen diferentes métodos, tales como: creación de terrazas, plantaciones adecuadas, o bien la explotación controlada de los puntos favorables a la infiltración con la finalidad de lograr una percolación de mayor volumen de agua en el acuífero (bombeo cerca de algún cuerpo de agua o almacenamiento). Una de las principales desventajas que se presenta en la recarga inducida es la colmatación o taponamiento, la cual se presenta en el lecho de una corriente cuando las aguas de la misma son muy turbias o se encuentran muy contaminadas.

Recarga Artificial

La recarga artificial consiste en la construcción de dispositivos o estructuras especialmente diseñadas para recargar acuíferos, de acuerdo con las necesidades que se tengan. **(Custodio, 1976)**.

El agua que se utiliza para la recarga tanto inducida como artificial, puede provenir de corrientes superficiales (tormentas, ríos, etc.), de origen exterior (importada) o bien de agua residual tratada.

2.1.1 Definición.

La recarga artificial puede definirse como el conjunto de técnicas, cuyo objetivo principal, es permitir una mejor explotación de los recursos hidráulicos subterráneos (acuíferos), por aumento de dichos recursos y creación de reservas, mediante una intervención directa o indirecta en el ciclo natural del agua, (Custodio, 1976). Es la reposición de depósitos de aguas subterráneas, realizada como resultado de las actividades del hombre. La recarga puede ser planeada como el caso de un pozo que se excava con el fin de introducir agua en el acuífero; o puede ser no planeada o incidental respecto a las actividades humanas, como el caso de una tubería enterrada que pierde agua en el terreno (ONU, 1977).

De acuerdo con la definición hecha por las Naciones Unidas, la *recarga no planeada* se produce sin objetivo alguno, y es la consecuencia de alguna actividad humana, como el riego. La cantidad de agua que es recargada de manera no planeada, es mucho mayor que la cantidad de agua recargada artificialmente.

El riego desempeña un papel significativo en la recarga de aguas subterráneas en gran parte del mundo, las fosas sépticas, redes de distribución de agua potable y alcantarillado con pérdidas, pozos destinados a la eliminación de desechos industriales e instalaciones similares aportan grandes cantidades de agua al ambiente subterráneo. La práctica de estas operaciones pueden afectar significativamente la calidad del recurso subterráneo debido a los contaminantes

que contengan las descargas, especialmente aquellas que sean de origen industrial.

Por otra parte las presas, que se diseñan para almacenar grandes cantidades de agua superficial, llegan a tener efectos considerables de recarga en sus alrededores pues, aunque existan formaciones rocosas en las proximidades del vaso, éstas son naturalmente muy duras y poco permeables, pero la recarga hidráulica es muy aceptable.

Muchas instalaciones hidráulicas ayudan a incrementar los volúmenes de agua, un ejemplo de ello son las tuberías de agua enterradas, incluso aquellas que se han instalado con el mayor cuidado, bajo supervisión técnica, pueden tener algunas fugas causando recarga incidental. Actualmente la contaminación de los acuíferos por fuga de albañales se ha convertido en un tema de preocupación mundial.

Las industrias, en muchos sitios inyectan sus desechos líquidos en pozos profundos; afortunadamente en la actualidad esas técnicas ya están reglamentadas en varios países.

2.2 Métodos de recarga artificial

Una amplia variedad de métodos para la recarga artificial de acuíferos se han desarrollado. La selección de un método en particular depende de muchos factores, tal como la disponibilidad del terreno, tipo de suelo, condiciones hidrogeológicas del sitio de recarga, financiamiento, tecnología disponible, calidad del agua residual para la recarga y posibles usos del agua recargada, (Asano, 1985).

El tipo de proyectos de recarga que pueden emplearse, se clasifican de la siguiente manera (Iturbe, 1992):

Métodos superficiales directos.
Métodos subsuperficiales directos.
Recarga por combinación superficial-subsuperficial.
Métodos indirectos.

2.2.1 Objetivos de la recarga

El método de recarga que se va a utilizar depende del objetivo que se persigue; además es indispensable conocer las características del subsuelo del sitio así como las del agua de recarga para tomar la decisión adecuada. Bourguet (1971), hace una relación de los objetivos de recarga que se presentan con más frecuencia:

- a) Restaurar un acuífero que ha sido explotado excesivamente, con la posibilidad de incrementar su vida útil hasta que se disponga de algún otro tipo de abastecimiento.
- b) Mantener los recursos y regularizarlos, especialmente en época de estiaje.
- c) Utilizar el acuífero para almacenar agua local o importada.
- d) Contribuir a la depuración del agua que se recarga por estancia prolongada en el acuífero.
- e) Evitar la contaminación del acuífero provocada por la intrusión salina en las zonas costeras, creando barreras hidráulicas.
- f) Utilizar el acuífero como conducto de distribución de nuevas aguas, cuando existe una red de pozos.

- g) Dar uso a ciertas aguas residuales, en especial aguas de refrigeración.
- h) Diluir las aguas existentes en el acuífero y ayudar a mantener un apropiado balance de sales, principalmente en zonas agrícolas.
- i) Reducir el decremento de los niveles freáticos por exceso de bombeo (no sustituye los niveles iniciales, solo puede detenerse).
- j) Mezclar aguas de diferentes calidades.

A su vez el autor da valores de preponderancia a los objetivos antes mencionados en base a experiencias anteriores, figura 2.2.

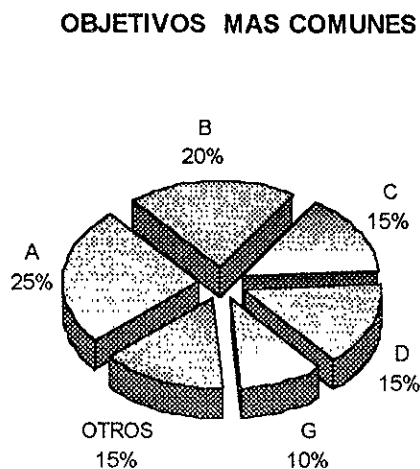


Figura 2.2 Objetivos de la recarga

2.2.2 Métodos superficiales directos

Se considera uno de los métodos más antiguos de recarga y por su simplicidad es el más usado; el agua se mueve desde la superficie hacia el acuífero y se va

percolando a través del suelo. Los métodos superficiales directos se subclasifican de acuerdo con la técnica de recarga:

- * Inundación
- * Zanjas y surcos
- * Estanques o balsas
- * Modificación de corrientes
- * Sobreirrigación

2.2.2.1 Inundación

Esta técnica de recarga solo puede efectuarse cuando se tiene una pendiente en el terreno entre 1 y 3 por ciento, con la finalidad de extender el agua que fluye naturalmente en una corriente sobre una gran área a través de diversos puntos de distribución, figura 2.3. Es necesario construir taludes alrededor del sistema para delimitar su superficie. La principal desventaja que presenta, es la excesiva evaporación del agua debido a la gran extensión de terreno que ocupa, (Iturbe, 1992).

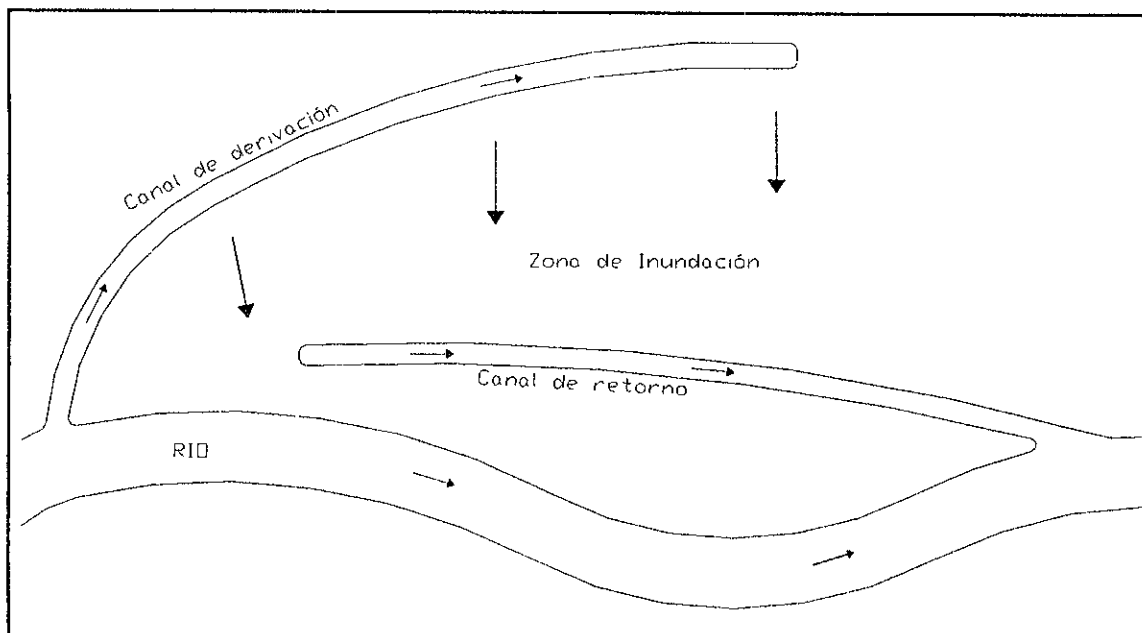


Figura 2.3 Recarga mediante inundación

2.2.2.2 Zanjas y surcos

Consiste en aprovechar una corriente natural para desviarla artificialmente hacia un sistema de surcos o zanjas. Tanto la desviación como las zanjas se construyen de acuerdo con la topografía. Por lo general las dimensiones de los surcos varían entre 0.3 a 1.8 m de ancho, contruidos con elementos utilizados en el laboreo de terrenos agrícolas, lo que ocasiona un sustancial ahorro económico en su construcción. Los surcos se pueden construir siguiendo las curvas de nivel del terreno, e irse ramificando partiendo de una zanja principal. La velocidad de circulación del agua debe ser lo suficientemente rápida para evitar que se depositen en el fondo materiales finos, pero lo suficientemente lenta como para no erosionar las paredes del terreno, figura 2.4.

El principal inconveniente que presenta es el de necesitar una gran superficie, pues el terreno inundado alcanza solo entre el 10 y el 20 por ciento del total necesario, **(Custodio, 1976)**. Es conveniente usar esta técnica en época de avenidas ya que puede disminuir el riesgo de desbordamiento del río, y en caso de que así suceda dicha agua puede ser recargada.

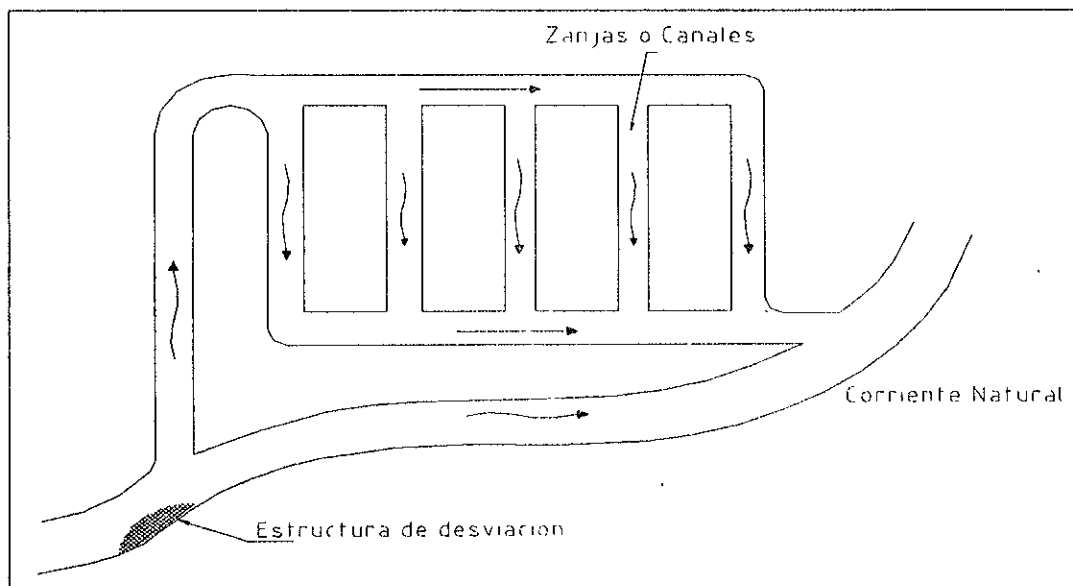


Figura 2.4 Recarga mediante Zanjas y Surcos

2.2.2.3 Estanques o balsas de infiltración

Es quizá uno de los métodos más utilizados, ya que permite el uso eficiente del espacio y requiere un mantenimiento simple. Los estanques se pueden construir mediante excavación o aprovechando la topografía del terreno. Es posible emplear estanques aislados o en serie para infiltrar una corriente o agua de escurrimiento.

El uso de estanques múltiples presenta la ventaja de que la capacidad de almacenamiento aumenta el tiempo de recarga; en el caso de estanques en serie, el ubicado aguas arriba de la corriente actúa como clarificador y la posibilidad de interconectar un estanque con otro permite su mantenimiento periódico, figura 2.5.

El mantenimiento y la construcción de las balsas de infiltración es relativamente simple, por lo que pueden disponerse comunicadas entre sí mediante compuertas. Las paredes suelen tener un talud de 0.5:1 o de 1:1 con un ancho mínimo en la parte alta de 0.3 a 1 m (**Bianchi y Muchel, 1970**).

Una de las obras más grandes de recarga se encuentra en Whittier Narrows, Los Angeles California, EUA, que tiene un área de recarga de 279 Ha dividida en 15 estanques. El proyecto dispone de 750×10^6 l/d ($8.68 \text{ m}^3/\text{s}$) utilizando sólo alrededor de un tercio de los estanques durante las operaciones normales. El objetivo de este proyecto es recuperar las aguas subterráneas para extracción local y solo 16 por ciento de la recarga es agua residual renovada, siendo la diferencia drenaje pluvial y agua importada con un nivel de dilución comparable con la composición de muchas fuentes de agua superficial. Hasta la fecha no se ha detectado ningún decremento en la calidad de las aguas subterráneas ni se tienen evidencias de afectación en la salud humana (**Nellor et al, 1985**).

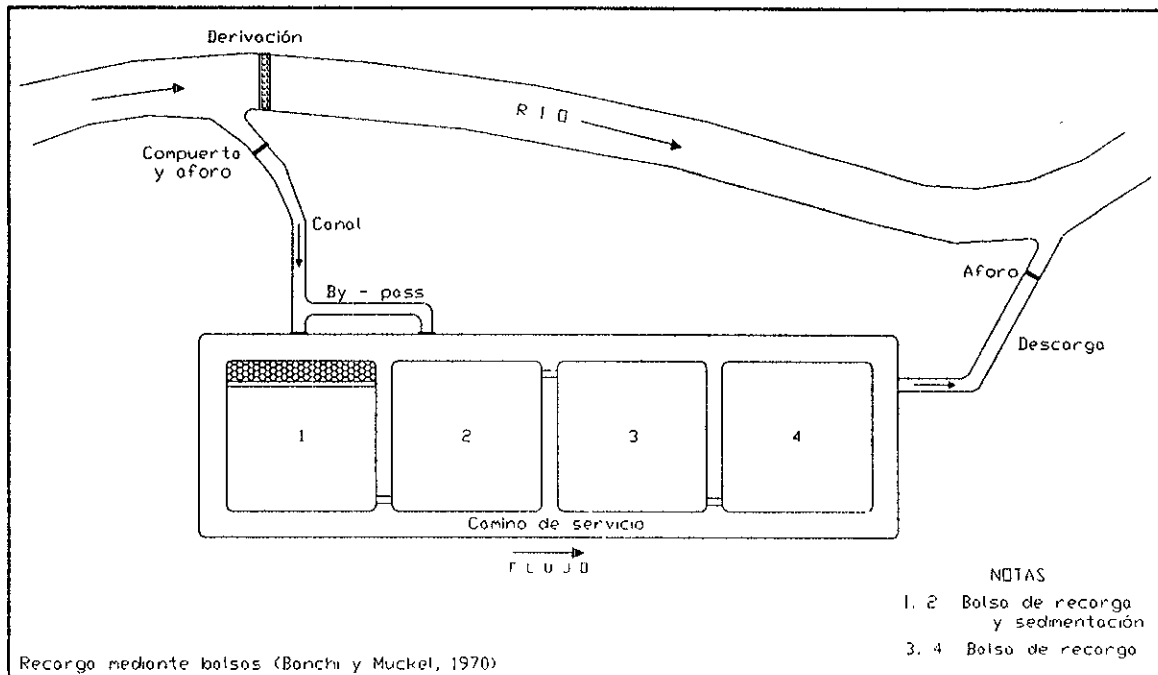


Figura 2.5 Estanques de infiltración

En Arizona se utilizan estanques de infiltración esparcidos. Aún cuando se emplean ciclos más cortos de inundación y secado se logran alcanzar tasas de infiltración hasta de 27.38 cm/d (100 m/a), (CEPIS, 1994).

2.2.2.4 Modificación de corrientes

Se utiliza comúnmente cuando no se cuenta con terreno disponible y adecuado para utilizar el método de balsas de infiltración, o cuando no se tiene una capacidad o caudal de almacenamiento necesario para su libre disposición (esto ocurre en zonas muy áridas), es por eso que la recarga se puede realizar en el mismo lecho del río.

El acondicionamiento del río consiste en aumentar las dimensiones del ancho de la plantilla del río, aplanar su superficie y escarificarla. Se pueden construir mamparas y canalizaciones a todo lo ancho del cauce tal como se muestra en la figura 2.6, con el fin de aumentar el tiempo y la superficie de contacto. Las mamparas pueden construirse con los mismos materiales del río, debe tenerse un programa de mantenimiento de las mismas, antes y después de que se pueda presentar una avenida, ya que pueden ser destruidas por dichas corrientes. Dentro del mantenimiento, debe considerarse el desasolve de los sólidos depositados en el fondo ya que si estos llegan a acumularse, puede disminuir el volumen de infiltración. Es conveniente construir represas a lo largo del río con materiales impermeables para evitar cualquier desbordamiento, (CEPIS, 1994).

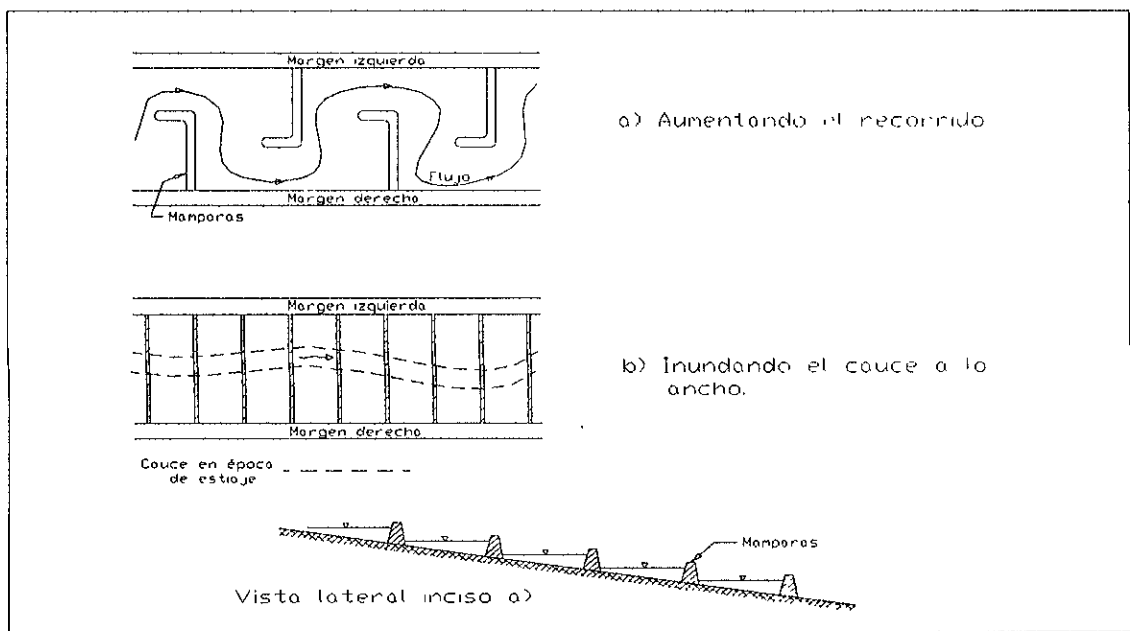


Figura 2.6 Modificación de corrientes

En este método se obstruye parte de la corriente natural de un canal o río con el fin de extender el lecho de la misma e incrementar el área de infiltración.

Se puede efectuar en combinación con los anteriores o mediante dragado y construcción de presas. Los costos de construcción y mantenimiento son relativamente bajos y en ocasiones se usa solo temporalmente, **(Iturbe, 1992)**.

2.2.2.5 Sobreirrigación

Cuando se riega durante las estaciones en que el riego no es necesario para el cultivo, se tiene una recarga artificial y se usa por lo general alguno de los métodos para irrigación y recarga analizados anteriormente.

En muchas ocasiones se sobrerriega agua residual a tierras con vegetación solamente para el proceso de infiltración. Este método difiere de los estanques de infiltración (en que el agua se embalsa) y de la irrigación normal (en que la tierra se cultiva). El agua residual de Lubbock (Texas), EUA, que se encuentra en exceso para los requerimientos de irrigación se dispone de esta manera **(Smith et al, 1979)**.

En ciertas condiciones geológicas, el flujo por tierra puede ser la solución para la renovación del agua residual. Esto es la aplicación de aguas residuales a pendientes, con el agua en movimiento a lo largo de la interfase suelo-vegetación donde se presenta una renovación biológica **(Wright y Rovey, 1979)**.

Sin embargo, el flujo terrestre puede ponerse en práctica sobre suelos permeables, cuando el agua residual se percola al acuífero. En el proyecto de Luggershall (Hampshire), el flujo terrestre utilizó aproximadamente 0.8×10^6 l/d de efluente secundario tratado. El sitio se localiza sobre una pendiente suave al lado de un valle seco sobre el acuífero de Chalk. Este método ha sido utilizado desde inicios de la década de 1950 y comprende cajones con compuerta de 20 m aparte, de donde el agua residual usualmente desaparece dentro de los 20 m. La parcela cubre un área de 1 ha y es relativamente plana, la parcela tiene un dique colector

en la parte baja pero éste se utiliza poco. Tasas de infiltración de alrededor de 400 mm/d se mantienen por cambio regular del área (CEPIS, 1994). En la figura 2.7 se muestran los principales métodos de irrigación.

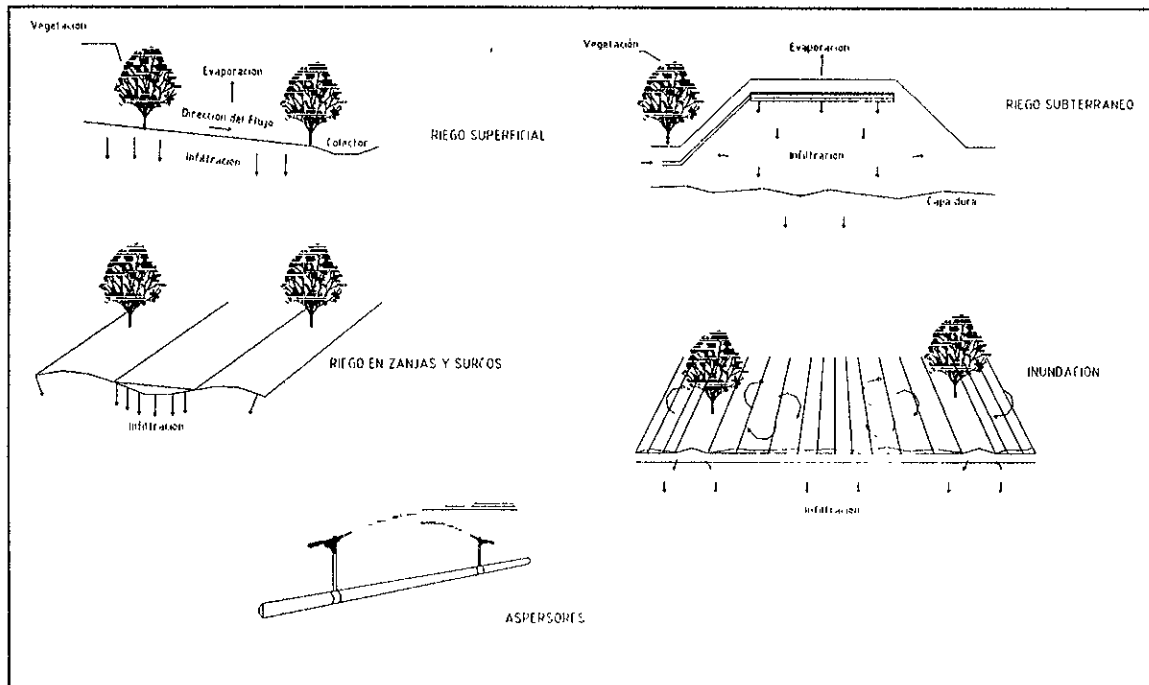


Figura 2.7 Sobreirrigación.

2.2.3 Métodos subsuperficiales directos

Por lo general esta metodología se emplea cuando un estrato confinado semipermeable separa la fuente de recarga del acuífero que requiere ser llenado. Estas técnicas incluyen: inyección de agua en grietas u otro tipo de abertura natural, pozos, redes de tubería. El agua utilizada en estas técnicas de recarga debe ser de excelente calidad ya que no pasa por la zona no saturada la cual sirve de filtro, ni por la oxidación que ocurre en la zona vadosa.

Estos métodos presentan la ventaja de que ocupan menos espacio en comparación con los métodos superficiales, por lo que en algunos sitios son más empleados (Iturbe, 1992).

Entre los métodos subsuperficiales directos se encuentran:

- * Aprovechamiento de aberturas naturales
- * Fosas
- * Pozos

2.2.3.1 Aprovechamiento de aberturas naturales

Tales aberturas pueden ser grietas y fracturas, las cuales actúan como un bajo dren de un cuerpo de agua o bien como una extensión de una tubería. Se requieren diferentes procedimientos para su control, dependiendo de la calidad del agua, tamaño, configuración y tipo de abertura.

2.2.3.2 Fosas y Tiros

Se construyen cuando el acuífero es de gran espesor constituido con materiales sueltos y permeables y con nivel freático profundo. Se pueden excavar grandes fosas o se pueden utilizar aquellas que sirvieron para la extracción de materiales pétreos (gravas, arenas), dando previamente una limpieza a dicho sitio.

La principal ventaja que ofrecen es el hecho de que pueden almacenar aguas provenientes de avenidas así como las pluviales, ya que su profundidad puede ser de algunos metros aunque algunas veces pueden alcanzar profundidades entre 10 y 20 m, figura 2.8. Por lo regular se coloca en el fondo un filtro de grava y arena con el objetivo de disminuir el riesgo de colmatación, (Custodio, 1976).

Existe la posibilidad de que las fosas sean naturales, por lo que el costo de esta técnica de recarga se puede comparar con las técnicas superficiales; sin embargo, si estas son construidas, su costo inicial y de mantenimiento puede llegar a ser mayor que el de los métodos anteriores, (Iturbe, 1992).

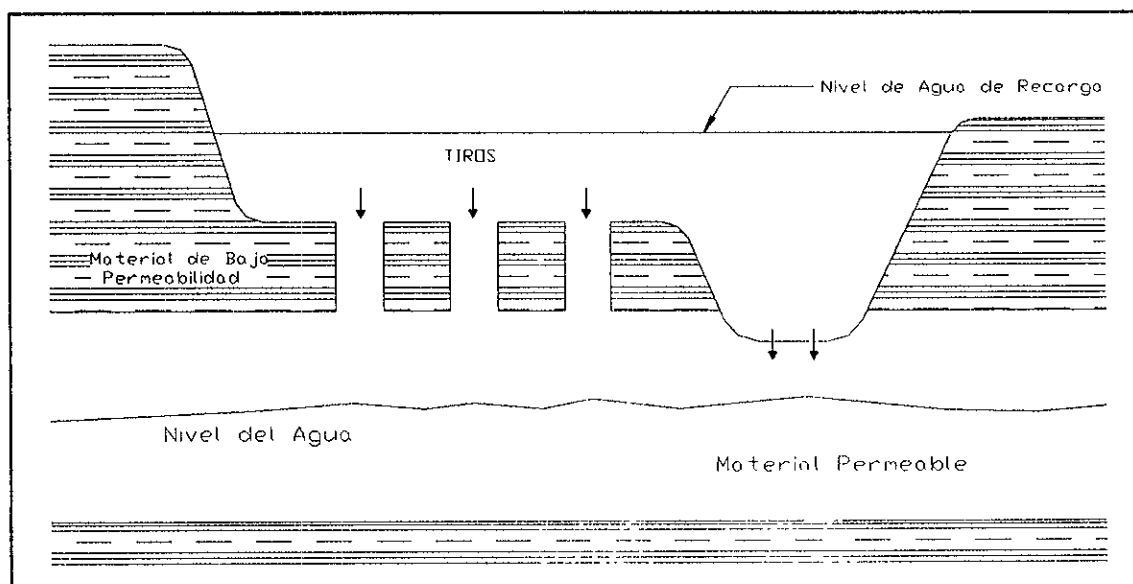


Figura 2.8 Fosos y Tiros.

2.2.3.3 Pozos

Los pozos de inyección tienen la gran ventaja de ocupar muy poco terreno por lo que se pueden utilizar en áreas urbanas en donde no se cuenta con espacio disponible para la recarga y el agua residual puede ser inyectada directamente en los acuíferos.

Este método de recarga de aguas residuales es particularmente aplicable en las islas donde el área de la tierra es limitada y la recarga cerca de la costa puede tener un doble beneficio, ya que en algunas costas se puede presentar intrusión salina debido a la sobreexplotación del agua subterránea y con la recarga artificial se puede crear una barrera hidráulica para atenuar este fenómeno y así evitar la contaminación del agua usada para consumo humano, (CEPIS, 1994).

Los pozos de recarga, también llamados pozos de inyección, son comúnmente usados cuando el acuífero se encuentra cubierto por capas de muy baja permeabilidad. Cuando el pozo de inyección se instala sobre materiales no consolidados, la sección superior del mismo requiere de un ademe para evitar cualquier derrumbe. Para la construcción de estos pozos es necesario colocar en la parte inferior una malla, la cual debe estar rodeada por un filtro de arena y grava. Mientras que alrededor del ademe se instala un sello de concreto para evitar que la presión provocada por la inyección ocasione fallas en el ademe. En la figura 2.9 se muestra un pozo construido en un acuífero confinado. Es posible construir pozos de inyección en acuíferos no confinados donde el terreno disponible para la recarga es muy limitado; figura 2.9.

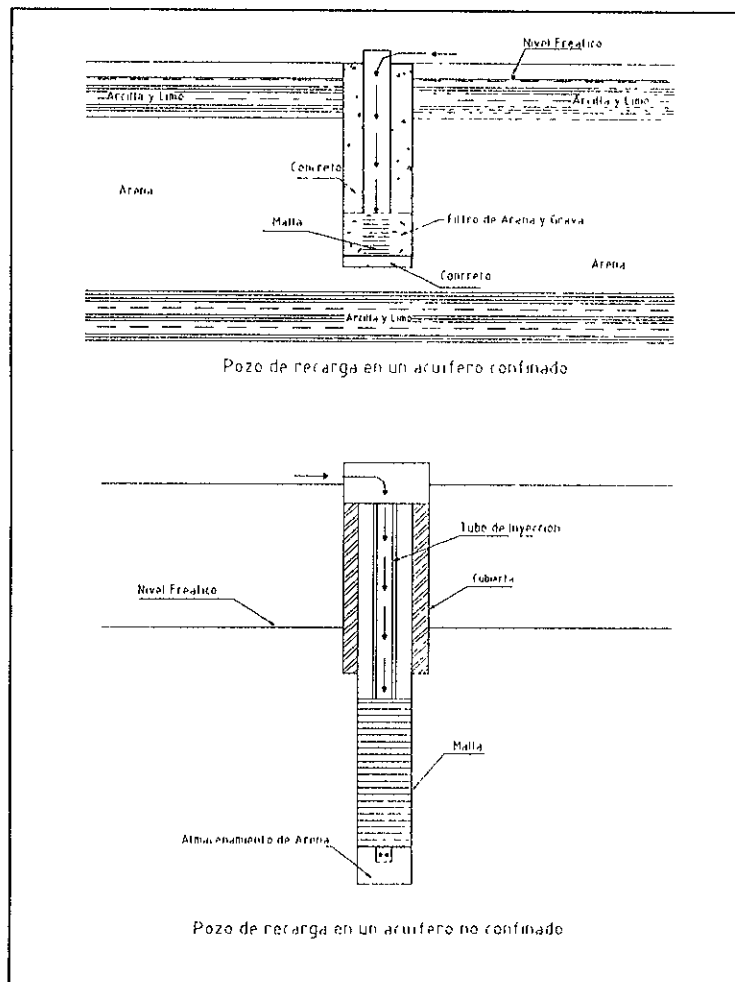


Figura 2.9 Pozos de inyección.

Para el diseño de los pozos de recarga es necesario tomar en cuenta los siguientes factores:

- * Objetivo de la recarga,
- * Cantidad de agua que se va a inyectar ,
- * Tasa de flujo que acepta el acuífero (depende del gradiente hidráulico),
- * Permeabilidad del suelo,
- * Características del agua para la recarga.

Con el uso de los pozos es factible incrementar las tasas de inyección obligando así a que la calidad del agua residual debe ser por lo menos igual a la del acuífero, por otra parte los sólidos suspendidos, las impurezas químicas y el crecimiento de materia biológica pueden colmatar rápidamente los pozos ocasionando la reducción de las tasas de infiltración, las principales causas que motivan la colmatación pueden ser las siguientes, **(CEPIS, 1994)**:

- * Acumulación de gas en el acuífero,
- * Partículas suspendidas en el agua de recarga,
- * Incremento de las bacterias y biocolmatación,
- * Reacciones químicas entre el agua de recarga y el agua subterránea,
- * Cambios en las arcillas cuando están en contacto directo con el agua de recarga.

La temperatura del agua juega un papel muy importante, ya que si se inyecta agua con temperatura mayor que la del acuífero este último puede verse afectado por contaminación térmica.

A continuación se presentan algunas soluciones para eliminar el taponamiento de los pozos:

- a) Bombear y agitar continuamente el agua del pozo hasta lograr remover el material adherido que obstruye el paso del agua.
- b) Agregar agentes oxidantes con el fin de eliminar la materia orgánica que se ha formado.
- c) Usar tratamientos químicos específicos para remover incrustaciones causadas por precipitación química.

Las últimas dos soluciones no son muy aconsejables, ya que si no se toman las precauciones necesarias en el manejo de tales sustancias, se puede afectar la calidad del agua del acuífero, **(Iturbe, 1992)**. Se ha logrado obtener buenos resultados en la utilización de este método de recarga, tal es el caso de la recarga del acuífero de caliza de Florida, en este lugar las aguas residuales tratadas fueron inyectadas con éxito durante 12 meses a un ritmo de 12×10^6 l/d **(Hickey y Ehrlich, 1984)** con el propósito de poder crear un almacén de agua subterránea relativamente potable dentro del acuífero de St. Petesburg (Florida), Estados Unidos.

Para la recuperación de las reservas de aguas subterráneas en El Paso (Texas), Estados Unidos, se realizó un proyecto con pozos de recarga, el agua residual con un gasto de 38×10^6 l/d se trata en un sistema que consiste en 10 pasos antes de ser recargados al acuífero a través de 10 pozos de 244 m de profundidad, cabe destacar que el agua recuperada logró alcanzar los estándares requeridos para agua potable.

En Alemania, la principal forma de recarga de acuíferos se hace con estanques, pero en Langen se probaron diferentes métodos, en el que se incluye un pozo de 18 m de profundidad **(Touissant, 1985)**. En este lugar el nivel freático se encuentra aproximadamente a 5 m, y en 300 días lograron recargar alrededor de $12\,000\text{ m}^3$ de aguas residuales tratadas, **(CEPIS, 1994)**.

2.2.4 Recarga por combinación superficial - subsuperficial

Anteriormente se mencionó que el principal problema que presenta la recarga con pozos es que se requiere un agua con turbiedad baja y de mejor calidad; mientras que en la recarga superficial no siempre se cuenta con materiales permeables en

la zona de recarga, dados estos inconvenientes se ha propuesto una solución empleando la recarga mixta, es decir utilizando ambas técnicas de recarga.

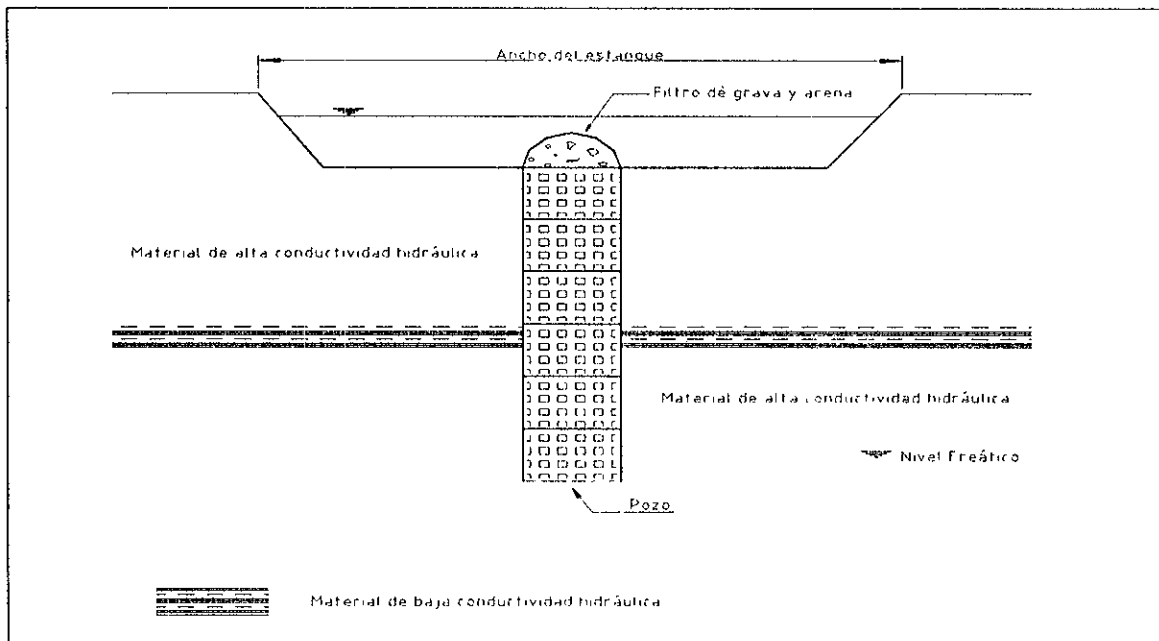


Figura 2.10 Recarga por combinación superficial - subsuperficial.

En la figura 2.10, se presenta la combinación de *balsas* y *pozos* de recarga. Las *balsas* recargan el acuífero superior el cual actúa como filtro, mientras que los *pozos* recogen esta agua y la conducen hacia el acuífero inferior. La zona del acuífero superior está constituida con materiales impermeables ocasionando que el agua tenga un mayor recorrido antes de alcanzar al pozo, lo que equivale al tratamiento previo mejorando la calidad del agua.

Alrededor de cada pozo se tiene un radio R equivalente a la porción del área ocupada por cada balsa. Para esta técnica de recarga es necesario saber el área de influencia para cada balsa y se puede determinar ocupando el método de los polígonos de Thiessen, (Custodio, 1976).

2.2.5 Métodos indirectos

De acuerdo con las técnicas más comunes la recarga indirecta se subclasifica en:

- * Recarga inducida por fuentes de agua superficiales.
- * Modificación de acuíferos.

2.2.5.1 Recarga inducida por fuentes de agua superficiales

Consiste en instalar galerías de infiltración y sistemas de bombeo cerca de los cuerpos de agua (lagos, ríos) incrementando el bombeo y motivar la disminución de los niveles freáticos del acuífero, con la finalidad de provocar la infiltración del cuerpo de agua superficial.

La cantidad de agua recargada depende principalmente de las siguientes características:

- * Proximidad con el cuerpo de agua,
- * Conductividad hidráulica,
- * Trasmisibilidad del acuífero,
- * Gradiente hidráulico creado por el bombeo,
- * Permeabilidad del lecho de la corriente.

El caso de Kalamazoo, Michigan, es un ejemplo en donde se ha hecho este tipo de recarga, (**Asano, 1985**).

2.2.5.2 Modificación de acuíferos

La modificación de un acuífero se realiza mediante la construcción de estructuras que impidan el movimiento del flujo hacia el exterior o por técnicas para formar una capacidad de almacenamiento adicional.

En la India se han construido barreras para obstruir el flujo a lo ancho de los canales, lo cual ha requerido dragar zonas y posteriormente rellenarlas con material impermeable, figura 2.11.

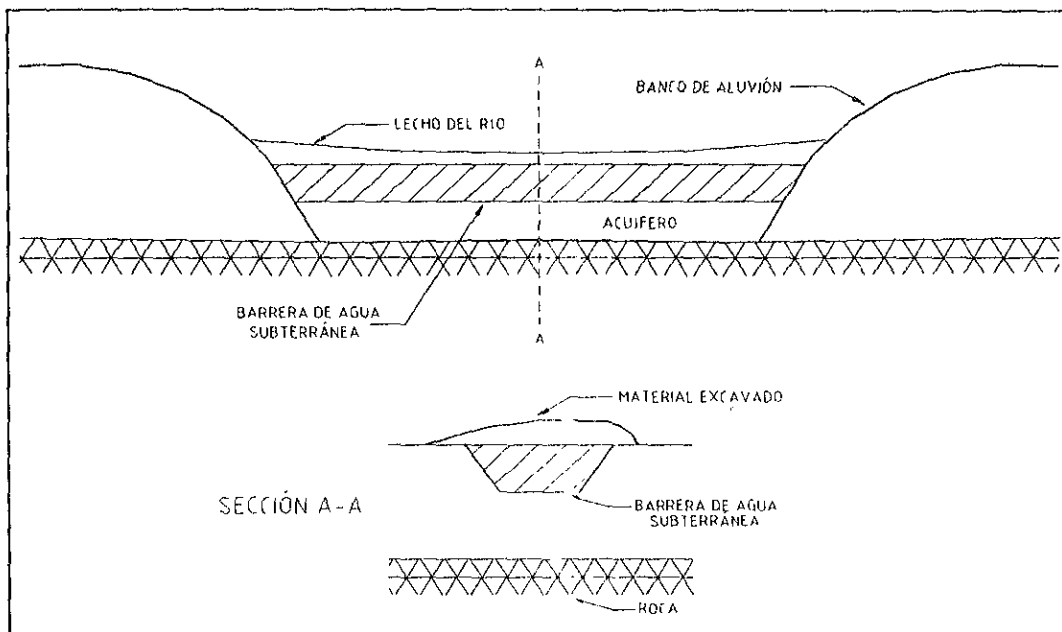


Figura 2.11 Modificación de acuíferos.

3

MARCO LEGAL SOBRE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN MÉXICO

En este capítulo se presenta un resumen de las leyes y normas que se deben contemplar antes de realizar un proyecto de recarga artificial de acuíferos, (métodos estudiados en el capítulo 2), así como la legislación referente a la calidad y uso del agua; es necesario tomar en cuenta la normatividad existente para poder cumplir con los reglamentos establecidos por las instituciones que así lo dispongan.

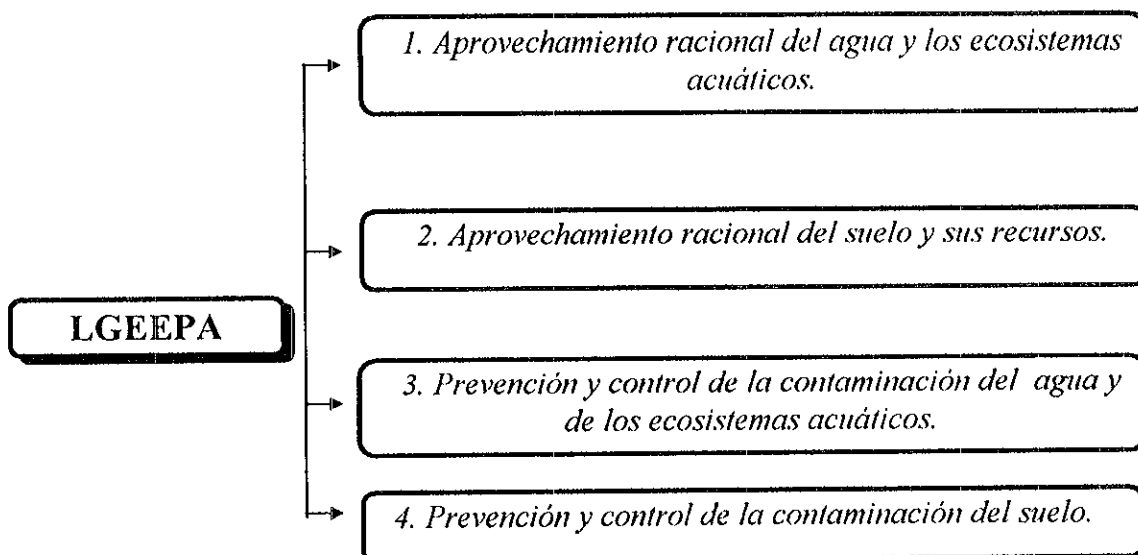
3.1 Legislación en cuanto al uso y calidad del agua.

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, señala:

Artículo 27. La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional corresponde originalmente a la Nación. Las aguas del subsuelo pueden ser libremente alumbradas mediante obras artificiales y apropiarse por el dueño del terreno; pero cuando lo exija el interés público o se afecten otros aprovechamientos, el Ejecutivo Federal podrá reglamentar su extracción y utilización y aun establecer zonas vedadas al igual que para las demás aguas de propiedad nacional.

Este artículo es importante analizarlo, ya que de aquí parte toda la reglamentación existente para el uso, disposición y aprovechamiento tanto del agua como del suelo.

Como primera instancia, la LGEEPA (Ley General del Equilibrio Ecológico y protección del Ambiente), define las políticas ecológicas y regula los instrumentos para su aplicación; se presenta a continuación un resumen de los artículos que deben tomarse en consideración antes y durante la realización de un proyecto de recarga artificial de acuíferos, dichos artículos han sido tomados principalmente de los Títulos tercero y cuarto (**LGEEPA, 1997**).



El Titulo tercero, capitulo 1 lleva por nombre *Aprovechamiento racional del agua y los ecosistemas acuáticos.* De los 10 artículos que conforman este capitulo se extrajeron los siguientes:

Artículo 88. Para el aprovechamiento racional del agua y los ecosistemas acuáticos se considerarán los siguientes criterios:

- I. Corresponde al Estado y a la sociedad la protección de los ecosistemas acuáticos y del equilibrio de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico:
- II. El aprovechamiento de los recursos naturales que comprenden los ecosistemas acuáticos debe realizarse de manera que no se afecte su equilibrio ecológico, y
- III. Para el equilibrio de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico, se deberá considerar la protección de suelos y áreas boscosas y selváticas y el mantenimiento de caudales básicos de las corrientes de agua, y la *recarga de los acuíferos.*

Artículo 90. La Secretaría, en coordinación con las de Agricultura y Recursos Hidráulicos y de Salud, expedirá las normas técnicas ecológicas para el abastecimiento y manejo de zonas de protección de ríos, manantiales, depósitos y en general, fuentes de abastecimiento de agua para el servicio de las poblaciones e industrias, y promoverá el abastecimiento de reservas de agua para consumo humano.

El siguiente artículo puede servir de ayuda cuando se use el método de modificación de corrientes, el cual es explicado con detalle en el capitulo anterior.

Artículo 91. El otorgamiento de las autorizaciones para *afectar el curso o cauce* de las corrientes de agua, se sujetará a los criterios ecológicos contenidos en la presente Ley.

Cuando sea necesaria la recarga artificial de acuíferos con la finalidad de evitar la intrusión salina y sus posibles repercusiones, es conveniente tomar en cuenta el artículo que a continuación se muestra, que para este caso está referida al agua subterránea:

Artículo 93. La Secretaría y la de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en sus respectivas esferas de competencia, realizarán las *acciones necesarias para evitar*, y en su caso controlar procesos de eutroficación, salinización y cualquier otro proceso de contaminación en las corrientes y cuerpos de aguas de propiedad de la nación.

A su vez el Titulo tercero abarca un capítulo llamado Aprovechamiento racional del suelo y sus recursos, el cual consta de 10 artículos. Es muy importante analizar el siguiente artículo, ya que toca el tema de lo referente al uso y protección del suelo:

Artículo 98. Para la protección y aprovechamiento racional del suelo se consideran los siguientes criterios:

- I. El uso del suelo debe ser compatible con su vocación natural y no debe alterar el equilibrio de los ecosistemas;
- II. El uso de los suelos debe hacerse de manera que éstos mantengan su integridad física y su capacidad productiva;
- III. Los usos productivos del suelo deben evitar prácticas que favorezcan la erosión, degradación o modificación de las características topográficas, con efectos ecológicos adversos;
- IV. En las zonas de pendientes pronunciadas en las que se presenten fenómenos de erosión o de degradación de suelo, se deben introducir cultivos y tecnologías que permitan revertir el fenómeno, y
- V. La realización de las obras públicas o privadas que por si mismas puedan provocar deterioro severo de los suelos, deben incluir acciones equivalentes de regeneración.

El Titulo cuarto de la presente Ley aborda el tema de la protección ambiental. Dentro del mismo encontramos el capitulo 2 llamado Prevención y control de la contaminación del agua y de los ecosistemas acuáticos, del cual se tomaron aquellos artículos que hacen alusión a la contaminación del agua.

Artículo 117. Se refiere a los criterios que hay que tomar para el control y prevención de la contaminación del agua. Corresponde al Estado y a la sociedad prevenir la contaminación de ríos, cuencas, vasos, aguas marinas, corrientes de agua, *incluyendo las aguas subterráneas*. Cuando se produce cualquier tipo de contaminación en el agua, conlleva a la responsabilidad del tratamiento de las descargas, para reintegrarla, en condiciones adecuadas para su utilización en otras actividades y para mantener el equilibrio de los ecosistemas.

Artículo 118. Que se refiere al establecimiento de criterios sanitarios para el uso, tratamiento y disposición de las aguas residuales, la formulación de normas técnicas que deberá satisfacer el tratamiento del agua para el uso y consumo humano.

Artículo 119. Corresponde a la Secretaria, en coordinación con la Secretaria de Agricultura Recursos Hidráulicos, y las demás autoridades competentes, expedir las normas técnicas para el vertimiento de aguas residuales en redes colectoras, cuencas, cauces, vasos, aguas marinas, *así como para infiltrarla en los terrenos*.

Artículo 120. Con la finalidad de evitar la contaminación del agua, queda bajo la responsabilidad de los organismos federales y locales la regulación de: las descargas ocasionadas por actividades industriales, agropecuarias, municipales; la aplicación de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas; *las infiltraciones que afecten los mantos acuíferos*; el vertimiento de residuos sólidos en cuerpos acuáticos.

Artículo 121. No podrán descargarse o *infiltrarse* en cualquier cuerpo o corriente de agua, en el suelo o subsuelo, aguas residuales contaminadas sin previo tratamiento y con la autorización otorgada por las instituciones locales o federales correspondientes.

Artículo 122. Las aguas residuales provenientes de usos municipales, públicos, industriales o agropecuarios que se descarguen en los sistemas de alcantarillado, y demás depósitos o corrientes de agua, así como las que por cualquier medio se *infiltran* en el subsuelo o que se derramen en los suelos, deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir:

- I. Contaminación de los cuerpos receptores;
- II. Interferencias en los procesos de depuración de las aguas, y
- III. Trastornos, impedimentos o alteraciones en los correctos aprovechamientos, o en el funcionamiento adecuado de los sistemas, y en la capacidad hidráulica en las cuencas, cauces, vasos, *mantos acuíferos*, y demás depósitos de propiedad nacional, así como de los sistemas de alcantarillado.

Artículo 123. Se refiere a las descargas vertidas en las redes colectores, cuerpos de agua, y los derrames de aguas residuales en los suelos o su *infiltración* en terrenos, las cuales deberán satisfacer las normas técnicas ecológicas que para tal efecto se expidan. Cuando dichas descargas, derrames o *infiltraciones* contengan materiales o residuos peligrosos, deberán contar con la autorización previa de la Secretaría.

Artículo 124. Cuando las aguas residuales afecten o puedan afectar fuentes de abastecimiento de agua, la Secretaría lo comunicará a la Secretaría de Salud y promoverá ante la autoridad competente la negativa del permiso autorización correspondiente, o su inmediata revocación, y en su caso, la suspensión del suministro.

Artículo 128. Las aguas residuales provenientes del alcantarillado urbano podrán utilizarse en la industria y en la agricultura, si se someten en los casos que se requiera al tratamiento que cumpla con las normas técnicas emitidas por la Secretaría, en coordinación con las Secretarías de Agricultura y Recursos Hidráulicos y de Salud.

Artículo 133. La Secretaría y la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos; con la participación que en su caso corresponda a la Secretaría de Salud conforme a otros ordenamientos legales, realizarán un sistemático y permanente monitoreo de la calidad de las aguas, para detectar la presencia de contaminantes o exceso de desechos orgánicos y aplicar las medidas que procedan o, en su caso, promover su ejecución.

La LGEEPA en materia de Prevención y contaminación del suelo refiere este tema a los siguientes artículos:

Artículo 139. Toda descarga, depósito o *infiltración* de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta Ley, sus disposiciones reglamentarias y las normas técnicas ecológicas que para tal efecto se expidan.

Por otra parte la Ley de Aguas Nacionales se refiere a la planeación y programación de la administración y del uso eficiente y racional de los recursos naturales, y se suma a una tradición legislativa que da inicio con la Ley sobre irrigación promulgada en 1926. Esta Ley sustituye a la Ley Federal de Aguas, promulgada en 1972.

Esta Ley esta conformada de la siguiente manera:

Titulo Primero	Disposiciones preliminares
Titulo Segundo	Administración del agua
Titulo Tercero	Programación hidráulica
Titulo Cuarto	Derechos de uso o aprovechamiento de aguas nacionales.
Titulo Quinto	Zonas reglamentadas, de veda o de reserva
Titulo Sexto	Usos del agua
Titulo Séptimo	Prevención y control de la contaminación de las aguas
Titulo Octavo	Inversión en infraestructura hidráulica
Titulo Noveno	Bienes nacionales a cargo de "La Comisión"
Titulo Décimo	Infracciones sanciones y recursos

El tema de la *Administración del agua* está comprendido en el título segundo de la presente Ley el cual se divide en 5 capítulos, de donde se puede analizar el artículo que a continuación se muestra:

Artículo 7º. Se declara de utilidad pública:

II. La protección , mejoramiento y conservación de cuencas, *acuíferos*, cauces, vasos y demás depósitos de propiedad nacional, así como la *infiltración de aguas para reabastecer mantos acuíferos* y la derivación de las aguas de una cuenca o región hidrológica hacia otras.

IV. Restablecer el equilibrio hidrológico de las aguas nacionales, superficiales o del subsuelo, incluidas las limitaciones de extracción, las vedas, las reservas y el cambio en el uso del agua para destinarlo a uso doméstico.

Lo anterior establece que la RAA se considera una actividad pública, ya que los principales beneficiados de dicha actividad serían los pobladores de la zona que sea destinada para la realización de este tipo de proyectos, e inclusive aquellas zonas que pertenezcan al mismo acuífero donde se pretenda hacer la recarga.

En lugares donde los acuíferos han sido sobreexplotados de tal forma que estos estén contemplados como zonas de veda o de reserva, el Ejecutivo Federal establecerá zonas de veda de acuerdo con las condiciones que se presenten en la zona afectada, tomando en cuenta lo siguiente:

Artículo 38. El Ejecutivo Federal podrá reglamentar la extracción y utilización de aguas nacionales, establecer zonas de veda o declarar la reserva de aguas en los siguientes casos de interés público:

- I. Para prevenir o remediar la sobreexplotación de los acuíferos;
- II. Para proteger o restaurar un ecosistema;
- III. Para preservar fuentes de agua potable o protegerlas contra la contaminación;
- IV. Para preservar y controlar la calidad del agua; o
- V. Por escasez o sequía extraordinarias.

De acuerdo con el *Artículo 39*, una vez que se haya detectado un acuífero con problemas de sobreexplotación es conveniente dar parte a las autoridades competentes para que adopten las medidas necesarias, en cuanto a los volúmenes de extracción, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales para abordar tales situaciones.

Para el análisis de este proyecto se consideró el uso de agua residual tratada, (sus características se muestran en el capítulo 4), por lo que los artículos que a continuación se mencionan se refieren a los usos y calidad de dicha agua.

Artículo 47. Las descargas de aguas residuales a bienes nacionales o su *infiltración* en terrenos que puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos, se sujetarán a lo dispuesto en el Título séptimo.

“La Comisión” promoverá el aprovechamiento de aguas residuales de los sistemas de agua potable y alcantarillado, que se podrán realizar por los municipios, los organismos operadores o por terceros.

Para la prevención y control de la contaminación de las aguas, la Ley de Aguas Nacionales presenta un capítulo con una serie de artículos que tocan el tema antes mencionado.

Artículo 87. “La Comisión” determinará los parámetros que deberán cumplir las descargas, la capacidad de asimilación y dilución de los cuerpos de aguas nacionales y las cargas de contaminantes que éstos pueden recibir, así como las metas de calidad y los plazos para alcanzarlas, mediante la expedición de Declaratorias de Clasificación de los Cuerpos de Aguas Nacionales, tales declaratorias contendrán:

I. La delimitación del cuerpo de agua clasificado;

II: Los parámetros que deberán cumplir las descargas según el cuerpo de agua clasificado conforme a los periodos previstos en el reglamento de esta ley;

III. La capacidad del cuerpo de agua clasificado para diluir y asimilar contaminantes; y

IV. Los límites máximos de descarga de los contaminantes analizados, base para fijar las condiciones particulares de descarga.

La infiltración de aguas residuales para recargar acuíferos requiere permiso de “La Comisión” y deberá ajustarse a las normas oficiales mexicanas que al efecto se emitan; así lo menciona el *Artículo 91 de la LGEEPA*.

3.2 Generalidades sobre la legislación de recarga de acuíferos.

La Comisión Nacional del Agua (CNA), ha creado el anteproyecto de la NOM-007-CNA-1996, que lleva el nombre “Requisitos el Diseño, Construcción y Operación de las Obras de Recarga Artificial de Acuíferos”. El presente trabajo esta reglamentado por dicha norma, siguiendo cuidadosamente cada una de las consideraciones que en la misma se mencionan.

El objetivo de esta norma es el siguiente: Establecer los requisitos mínimos para el diseño, construcción y operación de las obras para la recarga artificial de acuíferos, así como las características de calidad del agua para la recarga artificial, con objeto de proteger los acuíferos.

Esta norma se aplica al diseño, construcción y operación de obras de recarga artificial existentes y nuevas destinadas a incrementar los volúmenes del agua subterránea y/o a mejorar la calidad del agua del acuífero; esta norma no es aplicable cuando se tenga el caso de recarga incidental, ni a las obras de recarga domésticas unifamiliares.

De acuerdo con la NOM-007-CNA-1996, los métodos de recarga artificial se clasifican en dos grupos: recarga por superficie y recarga por pozos; estos métodos son descritos a detalle en el capítulo 2; mientras que el agua de recarga puede ser de lluvia, escurrimientos, cuerpos de agua superficiales y agua residual.

En los capítulos posteriores se ve a detalle las consideraciones que se tomaron para realizar el diseño del método seleccionado así como su construcción operación y mantenimiento.

3.3 Selección del método de recarga.

La recarga artificial del acuífero puede hacer que se presenten condiciones favorables para lograr la disminución de los hundimientos del terreno; para el control de flujo subterráneo; para un manejo más eficiente del acuífero y para almacenar agua para su uso futuro.

Cuando se proyecte una instalación de recarga artificial y una vez definidos sus objetivos, se deben tomar en cuenta consideraciones de varios tipos para elegir el sistema de recarga y para dimensionarlos adecuadamente.

Para efectuar la recarga por infiltración (o por superficie) es necesario cumplir con las dos condiciones siguientes:

- 1) Existencia de sitios y zonas permeables que permitan la infiltración adecuada hacia el acuífero.

Entre las estructuras hidrogeológicas que son usadas con mayor frecuencia para la realización de este tipo de obras, se tienen las siguientes: Cadenas montañosas y mesetas kársticas carbonatadas (tipo de superficie nivelada, elevada, compuesta de capas potentes de rocas sedimentarias kársticas, con inclinación débil, u horizontales), (**Diccionario geomorfológico, 1989**). Estas superficies pueden absorber grandes cantidades de agua, pero a menudo liberan aguas una vez realizada la infiltración, por medio de manantiales alimentados por corrientes subterráneas de flujo rápido.

En climas templados - húmedos, las zonas que mejor se comportan a la recarga artificial son los terrenos aluviales antiguos, los lechos de ríos fósiles enterrados y los abanicos aluviales entrelazados de valles principales y sus afluentes (ONU, 1977). En las zonas áridas, los terrenos aluviales fluviales recientes son la mejor opción para la recarga, y en algunas ocasiones estas zonas se comportan mejor que las de las zonas húmedas, debido a que los mantos freáticos están sometidos a fluctuaciones naturales de consideración, (Custodio, 1976).

2) Existencia de volúmenes de agua susceptibles de utilizarse para la recarga.

Los aspectos económicos juegan un papel importante durante la ejecución de un proyecto de recarga artificial y estos pueden variar de acuerdo al método de recarga seleccionado.

Además de las consideraciones económicas es necesario tener un conocimiento completo y detallado de las características geológicas e hidrológicas que presenta la zona para seleccionar apropiadamente el lugar y el tipo de recarga. Concretamente es necesario considerar las siguientes características, parámetros y datos: contornos geológicos; contornos hidráulicos; caudal de entrada y salida de agua; capacidad de almacenamiento del acuífero; porosidad; conductividad hidráulica; transmisividad; descarga natural de manantiales; recursos hidráulicos disponibles para la recarga; recarga natural; balance hidráulico; litología; y profundidad del acuífero.

3.4 Características del agua de recarga.

Hace algunos años no se contaba con las normas y especificaciones que rigieran la calidad del agua destinada para recargar acuíferos, ya que anteriormente la recarga artificial solo dependía de las condiciones locales del sitio elegido para la

recarga, del método empleado y del tratamiento que tuviera el agua a utilizar en dicha recarga, obligando así, a no garantizar la calidad del agua del acuífero recargado y en el peor de los casos a ocasionar la contaminación de los almacenamientos subterráneos.

Debido a tal situación, actualmente en México se tiene el anteproyecto de la NOM-007-CNA-1996 "Requisitos para el diseño, construcción y operación de las obras de recarga artificial de acuíferos"; en donde se describe con detalle las características que debe cumplir el agua destinada para la recarga de acuíferos.

De acuerdo con lo anterior, la norma señala que la calidad del agua destinada para la recarga debe ser igual a la calidad del agua del acuífero que va a ser recargado, pero, cuando el acuífero presente en su composición mejor calidad que los valores límites permisibles que señala la NOM-127-SSA1-1994 (tabla 3.1), serán aceptables el o los valores que aparezcan en esta última. Si el acuífero presenta menor calidad en los parámetros mencionados en la tabla 3.1 prevalecerá el valor que tenga el acuífero.

La tabla antes mencionada esta dividida en tres tablas, la primera muestra los límites permisibles de características bacteriológicas, la segunda queda conformada por los límites permisibles de características físicas y organolépticas, y la última está relacionada con las características químicas que debe contener el agua.

<i>CARACTERÍSTICA</i>	<i>LÍMITE PERMISIBLE</i>
Organismos Coliformes Totales	2 NMP/100 ml 2 UFC/100 ml
Organismos Coliformes Fecales	No detectable NMP/100 ml Cero UFC/100 ml

Límites permisibles de características bacteriológicas.

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Color	20 unidades de color verdadero en la escala platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico y químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

Límites permisibles de características físicas y organolépticas.

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Bario	0.7
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN)	0.07
Cloro residual libre	0.2-1.5
Cloruros (como CL)	250
Cobre	2.0
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO ₃)	500
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Hierro	0.30
Fluoruros (como F)	1.50
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10
Nitritos (como N)	0.05
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH)	6.5-8.5
Plaguicidas (µg/l): Aldrin y dieldrin (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.30
DDT (total de isómeros)	1.0
Gamma-HCH (lindano)	2
Hexaclorobenceno	0.01
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20
2.4-D	50
Plomo	0.025
Sodio	200
Sólidos disueltos totales	1000
Sulfatos (como SO ₄)	400
SAAM	0.50
Trihalometanos totales	0.20
Zinc	5

Fuente: Diario Oficial, NOM-127-SSA1-1994

Tabla 3.1

3.4.1 Calidad del agua de recarga empleando métodos superficiales.

Cuando la recarga se realice mediante algún *método superficial*, la calidad del agua debe satisfacer los siguientes criterios:

- El mínimo pretratamiento con los que deberá contar el agua será sedimentación para lograr la remoción de SST, con la finalidad de prevenir una rápida colmatación del suelo.
- Cuando se emplee agua de lluvia y/o escurrimientos superficiales no urbanos, el agua de recarga deberá ser mejor o igual a la calidad que la del acuífero, tomando como base los siguientes parámetros: Na, K, Ca, Mg, Fe, NO₃, Cl, HCO₃, SO₄, F, SDT. En campo se determinarán: pH, temperatura, potencial de oxidación-reducción y conductividad eléctrica. También se analizarán los parámetros señalados en la tabla 2 y 3 de la NOM-001-ECOL-1996.
- Si mediante un proyecto piloto se demuestra la mejoría de la calidad del agua de recarga, podrá aceptarse que ésta sea de inferior calidad a la del acuífero, siempre y cuando el agua que ingrese al mismo, sea de igual o mejor que la nativa.
- Si el agua destinada para la recarga es residual tratada, la calidad de esta debe cumplir con los parámetros señalados en la tabla 3.1 y además se analizarán huevos de helminto.
- Cuando se presente en la zona de recarga un acuífero de alta vulnerabilidad (acuífero conectado hidráulicamente a la superficie y que presenta una conductividad hidráulica mayor a 10⁻³ m/s), la concentración de CF (coliformes fecales) no debe ser mayor a la señalada en la norma para agua potable, NOM-127-SSA1-1994, la cual establece que no deben existir coliformes fecales.

-
- Si el agua de recarga es residual tratada la presencia de huevos de helminto deberá ser de uno por litro como límite máximo permisible, en base a lo establecido en la NOM-001-ECOL-1996.

3.4.2 Calidad del agua de recarga empleando pozos de inyección.

Por otra parte, si el método de recarga es mediante *pozos de inyección*, la calidad del agua a recargar será la del mismo acuífero, debiendo hacerse el análisis de los parámetros señalados con anterioridad.

- Estas especificaciones son aplicables en agua de lluvia, escurrimientos, cuerpos superficiales y pozos de absorción no domésticos .
- Si el agua de la recarga es residual tratada deberán determinarse los mismos parámetros que se mencionaron en el apartado 3.4.1, y en todos los casos el agua de recarga deberá cumplir con los límites permisibles para agua potable publicados en la NOM-127-SSA1-1994.
- Será necesario realizar análisis periódicos de virus tanto en el agua de recarga como en los pozos de observación, siempre y cuando el acuífero sea destinado a uso doméstico o público urbano.
- También se realizarán estudios de toxicidad a corto tiempo, con el fin de detectar la presencia o ausencia de mutágenos.

Lo anterior define claramente que cuando se use algún método de recarga mediante pozos de inyección, el agua de recarga deberá ser de mejor calidad que la usada en métodos superficiales. Esto es, debido a que los pozos introducen

directamente el agua en el acuífero, por lo que no existe el efecto de depuración en la zona no saturada.

En el caso de usar agua residual tratada ésta debe tener calidad de agua potable por lo que el sistema de tratamiento debe ser avanzado y con la tecnología específica según las características del agua residual.

4

APLICACIÓN DE RECARGA ARTIFICIAL EN EL ESTADO DE TLAXCALA

En gran parte del país la principal fuente de abastecimiento de agua, tanto agrícola como municipal la constituye el agua subterránea. También es conocido que cada vez se requiere de mayor bombeo para alcanzar los niveles a los que se encuentran los acuíferos. Querétaro, Guanajuato, Aguascalientes y Zacatecas son algunos ejemplos de estados en los que en gran parte de su territorio el agua subterránea se encuentra a más de 100 m de profundidad.

En este trabajo se escogió el estado de Tlaxcala por ser otro de los estados del país que presenta la misma problemática de escasez de cuerpos de agua superficiales, sequía y el consecuente abatimiento de sus acuíferos, debido a la sobreexplotación.

4.1 Disponibilidad y calidad del agua de recarga.

Uno de los principales problemas que enfrenta la recarga de acuíferos, es la fuente o disponibilidad del agua, ya que generalmente la demanda supera a la oferta. En el Estado de Tlaxcala existen volúmenes de agua disponibles, principalmente de agua residual. De toda el agua que es consumida en el estado, una pequeña parte es tratada y ésta es reusada en diferentes actividades tales como: riego de áreas verdes, industrias, etc.

Existe un remanente de agua residual tratada el cual puede ser destinado para la realización de obras de recarga artificial; dicho remanente puede verse incrementado con la apertura de nuevas plantas de tratamiento aunado a la ampliación de las ya existentes.

De acuerdo con el inventario nacional de plantas de tratamiento de aguas residuales, documento editado por CNA, en el año 1995 el Estado de Tlaxcala contaba con un total de 33 plantas de tratamiento de las cuales un par de ellas están en construcción y otras dos en proyecto (**CNA, 1995**); a tal informe se le anexaron los datos de la planta de tratamiento Cd. Industrial Xicotencatl formando un total de 34 plantas, este dato se obtuvo en la Coordinación General de Ecología del Estado de Tlaxcala (1996).

En la tabla 4.1 se muestran las plantas de tratamiento del Estado de Tlaxcala así como algunas de sus características, tales como, gasto de operación y de diseño, el tipo de tratamiento y el año de su puesta en marcha. Por el momento son once plantas que no se encuentran operando, cinco de ellas requieren rehabilitación y otras seis se encuentran en mantenimiento. Se observa que el 73.5% usan tratamiento a base de lagunas de estabilización; 11.8% son lagunas aireadas; los filtros biológicos al igual que las lagunas-pantano tiene el mismo porcentaje (5.8%); y el reactor de flujo ascendente ocupa solo el 2.94%. En la figura 4.1 se representan los porcentajes ya señalados.

LOCALIDAD	Q _{DF}	Q _{DIS}	PROCESO	OPERA	AIO	OBSERVACIONES
Altzayanca (Felipe Carrillo P.)	-	1.4	Lagunas de estabilización	NO	<80	Requiere rehabilitación
Apizaco A (Tequisquiác) *	81.52	100	Lagunas aereadas	SI	87	Requiere rehabilitación
Apizaco B *	85.26	180	Filtros biológico	SI	91	-
Calpulalpan	-	130.8	Lagunas de estabilización	-	95	En construcción
Calpulalpan (La Cañada)	-	35.6	Lagunas de estabilización	NO	92	En rehabilitación
Cd. Industrial Xicotencatl *	10	30	Lagunas aereadas	SI	-	-
Domingo Arenas (Muños)	1.5	2	Lagunas de estabilización	SI	<84	Requiere rehabilitación
Huamantla (B. Juárez)	-	5.4	Lagunas de estabilización	NO	<79	En rehabilitación
Huamantla (Fco. Tecocac)	-	1	Lagunas de estabilización	NO	<81	En rehabilitación
Huamantla (Fco. Villa)	1	1.3	Lagunas de estabilización	SI	<81	Requiere rehabilitación
Hueyotlipan	5	7	Lagunas de estabilización	SI	<81	Requiere rehabilitación
Ixtacuixtla (Atotonilco)	3.5	7.5	Lagunas de estabilización	SI	93	-
Lardizabal (Villalta)	-	6.4	Lagunas de estabilización	NO	<80	En rehabilitación
L. Cárdenas (Fco. Villa)	7	3.2	Lagunas de estabilización	SI	92	Requiere rehabilitación
L. Cárdenas (B. JUarez)	-	8.6	Lagunas de estabilización	NO	92	Requiere rehabilitación
M. Arista (Nanacaniipa)	-	19	Lagunas de estabilización	NO	<89	En rehabilitación
M. Arista (D. Arenas)	-	1.1	Lagunas de estabilización	NO	89	Requiere rehabilitación
Mazatecochco (J.Ma. Morelos)	8	13	Lagunas de estabilización	SI	<79	Requiere rehabilitación
Miguel Hidalgo Quilientia	-	4.05	Lagunas-Pantano	-	94	En construcción
Panotla	8	12	Lagunas de estabilización	SI	94	-
San Felipe Ixtacuixtla *	35.83	55	Lagunas aereadas	SI	79	-
Sanctorum (L. Cárdenas)	3	5	Lagunas de estabilización	SI	-	-
Sta. Anita Huilac.	-	10	Lagunas-Pantano	-	-	En proyecto
Sn. Pablo Apetatitlan	10	11.5	Lagunas de estabilización	SI	<81	Requiere rehabilitación
Tepetzititla	-	15	Lagunas de estabilización	NO	<89	Requiere rehabilitación
Tepeyanco (Atlamaxac) *	19.55	30	RAFA	SI	92	-
Tequexquitla, El Carmen T.	-	30	Filtros biológicos	-	-	En proyecto
Terrenate	-	2.2	Lagunas de estabilización	NO	<89	Requiere rehabilitación
Tlaxcala *	141.43	250	Lagunas aereadas	SI	85	-
Tlaxco	9	12.6	Lagunas de estabilización	SI	<78	Requiere rehabilitación
Tocatlan	1.5	7	Lagunas de estabilización	SI	-	-
Xalostoc	13	25	Lagunas de estabilización	SI	<84	Requiere rehabilitación
Xicohtzingo	8.5	22	Lagunas de estabilización	SI	<80	En rehabilitación
Zacatelco (Axocomanitla)	-	7.2	Lagunas de estabilización	NO	78	En rehabilitación

* Se cuenta con la Caracterización del Agua Tratada

RAFA - Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

AIO - Año de Inicio de Operación de la Planta

(CNA, 1995)

Tabla 4.1 Plantas de tratamiento en el estado de Tlaxcala

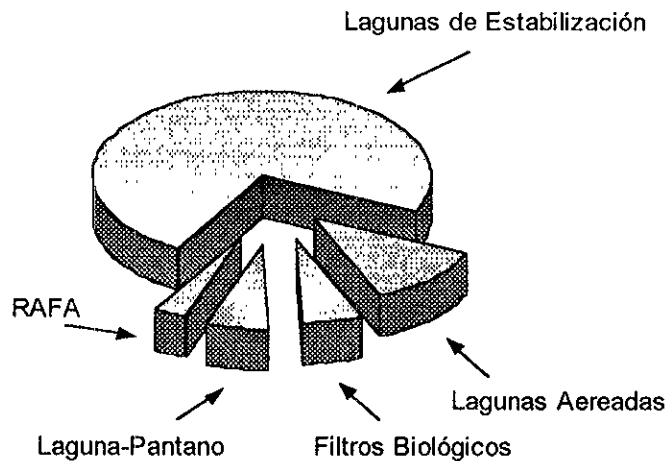


Figura 4.1 Tratamientos usados.

4.1.1 Selección de la planta de tratamiento.

A partir de la información obtenida, se hizo una selección muy cuidadosa de la planta de tratamiento de la cual será tomada el agua para la realización de este estudio, siguiendo los criterios que a continuación se muestran:

- ⇒ Disponibilidad
- ⇒ Fácil Transportación
- ⇒ Calidad

Disponibilidad. Para la realización de un proyecto de recarga artificial, es necesario contar con un volumen de agua lo suficientemente grande para lograr una mayor cantidad de agua infiltrada, siempre y cuando el medio así lo permita (suelo). Solo tres plantas de tratamiento manejan un caudal de diseño superior a 100 l/s, Apizaco A, Apizaco B, y Tlaxcala.

Fácil Transportación. Este es un factor que debe tomarse muy en cuenta, ya que cuando la fuente de abastecimiento se encuentra muy retirada de la zona de recarga los costos de transportación o conducción se incrementan drásticamente.

Calidad. Esta depende del método de recarga a utilizar (superficial, pozos, etc.), cumpliendo con los parámetros estipulados en el anteproyecto de norma NOM-007-CNA-1996.

De seis de las plantas de tratamiento mostradas en la tabla 4.1, se obtuvo información de la calidad tanto de sus efluentes como de sus influentes. La caracterización de las aguas residuales contienen parámetros biológicos y físicos; no se obtuvieron datos de los parámetros químicos en la dependencia encargada de las plantas de tratamiento **(C.G.E.E.T, 1996)**.

4.1.2 Caracterización

La caracterización del agua residual contiene 17 parámetros, divididos en físicos, químicos y biológicos. En las gráficas que se muestran en el Anexo I, se observa el comportamiento de los parámetros para las tres plantas de tratamiento que se estudiaron.

Es importante conocer la eficiencia con la que trabaja la planta de tratamiento que dotará de agua a la obra de recarga; este dato puede garantizar que la calidad del agua utilizada para la infiltración no ocasionará daños a los ecosistemas o a la salud humana.

La eficiencia del tratamiento de las plantas fué obtenido con la DBO_5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y con los SDT (Sólidos Disueltos Totales) contenidos en el agua residual, haciendo uso de la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{\phi_{INF} - \phi_{EFL}}{\phi_{INF}}$$

donde:

$$\begin{aligned} \phi_{INF} &= \text{valor del parámetro en el influente (mg/l)} \\ \phi_{EFL} &= \text{valor del parámetro en el efluente (mg/l)} \\ \eta &= \text{eficiencia (\%)} \end{aligned}$$

La eficiencia del tratamiento depende de la calidad del diseño, de la operación de la planta y de su tipo. Debido a lo anterior, la eficiencia de una planta de tratamiento es diferente en cada caso. En la tabla 4.2 se listan las eficiencias de los métodos más usuales, en términos del porcentaje de reducción para sólidos suspendidos (SST) y DBO principalmente.

A partir de la caracterización del agua se hizo un análisis de la eficiencia para cada planta de tratamiento, obteniendo como primer paso el promedio aritmético de la DBO para la época de estiaje y de lluvias, posteriormente se realizaron gráficas para observar el comportamiento de las eficiencias para un periodo de un año.

Eficiencia de remoción de DBO

En la tabla 4.3 se observan las plantas de tratamiento analizadas, así como las eficiencias logradas en sus procesos de tratamiento para la eliminación de DBO, considerando las épocas del año antes mencionadas, también se muestra gráficamente el comportamiento de los resultados obtenidos.

Epoca de estiaje: De las seis plantas de tratamiento analizadas, se observa que la planta de tratamiento "Apizaco B" es la que presenta una mayor eficiencia (84.05%) en sus procesos de tratamiento; en segundo lugar se encuentra la planta de Tlaxcala con el 81.15%. De acuerdo con la tabla 4.2, las plantas antes mencionadas cumplen satisfactoriamente con sus procesos de tratamiento, ya que alcanzan una eficiencia de remoción para la DBO mayor al 80%.

Proceso de tratamiento	Eficiencia de remoción (%)					
	DBO ₅	DQO	SST	P _{Total}	N _{Org.}	NH ₃ -H
Pretratamiento	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
Rejilla fina	-	-	5-20	-	-	-
Desarenadores	0-5 (a)	0-5 (a)	0-10 (a)	-	-	-
Sedimentación primaria	25-40	30-40	35-65	10-20	10-20	0
Lodos activados (proceso convencional)	80-95	80-85	80-90	10-25	15-50	8-15
Filtro percolador:						
Alta tasa, medio pétreo	65-80	60-80	60-85	8-12	15-50	8-15
Carga muy alta, medio Sintético	65-85	65-80	65-85	8-12	15-15	8-15
Biodiscos	80-85	80-85	80-85	10-25	15-50	8-15
Desinfección	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
Coagulación y sedimentación después de: pretratamiento o tratamiento secundario	40-70	40-70	50-80	70-90	50-90	0
Coagulación en tratamiento biológico	80-90	80-90	70-90	75-85	60-90	0
Adición de cal en un paso después de: pretratamiento o tratamiento secundario	50-70	50-70	60-80	70-90	60-90	0
Adición de cal en un paso en el tratamiento biológico	80-90	80-90	70-80	75-85	60-90	0
Adición de cal en dos pasos después de: pretratamiento o tratamiento secundario	50-85	50-85	50-90	85-95	70-90	0
Nitrificación en un paso con remoción de DBO carbonacea	80-95	80-90	70-90	10-15	75-85	85-95
Nitrificación en pasos separados después de: pretratamiento o tratamiento secundario	50-70	50-60	Pequeña	-	40-50	90-96
Desnitrificación en pasos separados	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
Desorción de amoníaco	0	-	0	0	-	60-95
Cloración al punto de quiebre	-	-	0	0	-	80-90
Intercambio iónico	0	0	0	0	0	90-95
Filtración	20-50	20-50	60-80	20-50	50-70	0
Adsorción con carbón activado	50-85	50-85	50-80	10-30	30-50	-
Ósmosis inversa	90-100	90-100	-	90-100	90-100	60-90
Electrodialísis	20-60	20-60	-	-	80-95	30-50

Tabla 4.2 Eficiencias para diferentes tratamientos.

Las plantas de tratamiento restantes resultaron inelegibles, ya que la eficiencia de remoción de DBO es menor al señalado en la tabla 4.2.

Epoca de lluvias: Para este periodo de análisis, la planta de tratamiento Apizaco B resultó la de mayor eficiencia (81.69%), y al igual que en el caso anterior, la planta de Tlaxcala se situó en segundo sitio alcanzando el 80.02% de eficiencia.

En la gráfica se observa que el comportamiento en los procesos de tratamiento para las plantas Apizaco B y Tlaxcala es muy parecido, resultando una mayor eficiencia en la época de estiaje que en la de lluvias.

Análisis de la eficiencia del tratamiento, a partir de la DBO						
PLANTA DE TRATAMIENTO	DBO INFLUENTE		DBO EFLUENTE		EFICIENCIA EN ESTIAJE (%)	EFICIENCIA EN LLUVIAS (%)
	ESTIAJE	LLUVIAS	ESTIAJE	LLUVIAS		
APIZACO A	150.67	173.33	57.67	50.33	61.72	70.96
APIZACO B	128.50	130.17	20.50	23.83	84.05	81.69
ATLAMAXAC	415.00	353.00	184.50	129.83	55.54	63.22
IXTACUIXTLA	788.33	868.83	247.67	236.02	68.58	72.83
TLAXCALA	159.17	184.33	30.00	36.83	81.15	80.02
XICOHTENCATL	104.50	75.00	64.67	49.00	38.11	34.67

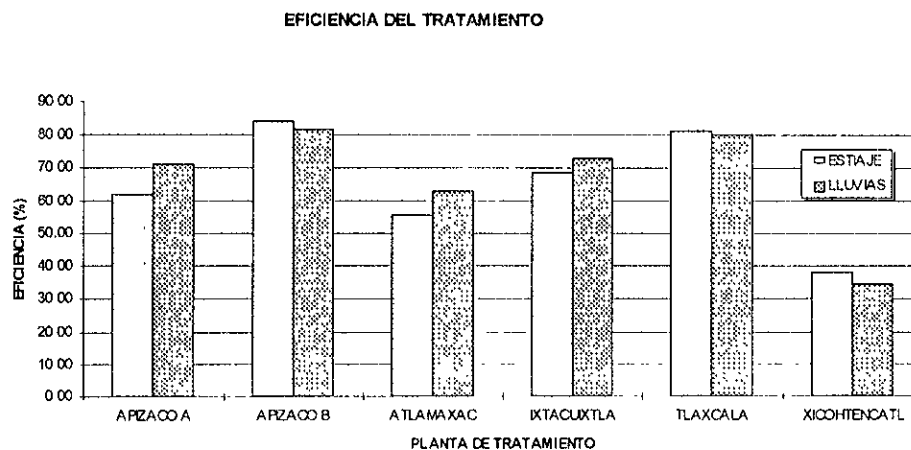


Tabla 4.3 Eficiencia del tratamiento a partir de la DBO

Eficiencia de remoción de SST

Al igual que la DBO, los SST (sólidos suspendidos totales) juegan un papel muy importante, ya que el valor contenido en el efluente de este parámetro deberá tomarse en cuenta para la selección de la planta de tratamiento. Cabe señalar que la eficiencia de una planta de tratamiento también depende de los SST, por esa razón se realizó el mismo análisis que en la DBO.

En la tabla 4.4 se muestran los resultados obtenidos tanto para la época de lluvias y de estiaje, así mismo, se muestra la gráfica correspondiente al comportamiento de la eficiencia para cada planta de tratamiento.

Epoca de estiaje: la Planta de tratamiento Apizaco B alcanzó una eficiencia aceptable siendo ésta del 85.44%; la Planta de Tlaxcala presentó una eficiencia del 82.68%, ambas plantas cumplen satisfactoriamente con los valores estipulados en la tabla para la remoción de sólidos suspendidos totales.

Epoca de lluvias:

Durante esta época, las plantas de tratamiento que resultaron con mayor eficiencia fueron, una vez más, la planta Apizaco B y la localizada en la capital del estado, registrando eficiencias superiores a las presentadas en la tabla 4.2.

De acuerdo con los criterios considerados en el apartado 4.1.1, la planta de tratamiento que más se ajusta a tales criterios es la de Tlaxcala. Esto es debido a que el gasto que maneja es suficiente para dotar de agua a la obra de recarga proyectada.

Por otra parte debido a que en los alrededores de la planta de Tlaxcala existe terreno disponible para la construcción de la obra, la conducción del agua no presenta grandes problemas, factor aunado al de la calidad, que de acuerdo a la

caracterización y eficiencias analizadas, la planta de tratamiento de Tlaxcala es la que más se ajusta a las características propuestas anteriormente.

Análisis de la eficiencia del tratamiento, a partir de SST						
PLANTA DE TRATAMIENTO	SST INFLUENTE		SST EFLUENTE		EFICIENCIA EN ESTIAJE (%)	EFICIENCIA EN LLUVIAS (%)
	ESTIAJE	LLUVIAS	ESTIAJE	LLUVIAS		
APIZACO A	160.67	187.17	47.67	49.17	70.33	73.73
APIZACO B	137.33	181.5	20	24.67	85.44	86.41
ATLAMAXAC	257.67	323.67	114.5	102.33	55.56	68.38
IXTACUIXTLA	448.50	324.83	155	206.33	65.44	36.48
TLAXCALA	160.67	196.5	27.83	40.17	82.68	79.56
XICHTENCATL	86.45	95.5	51.33	71.5	40.62	25.13

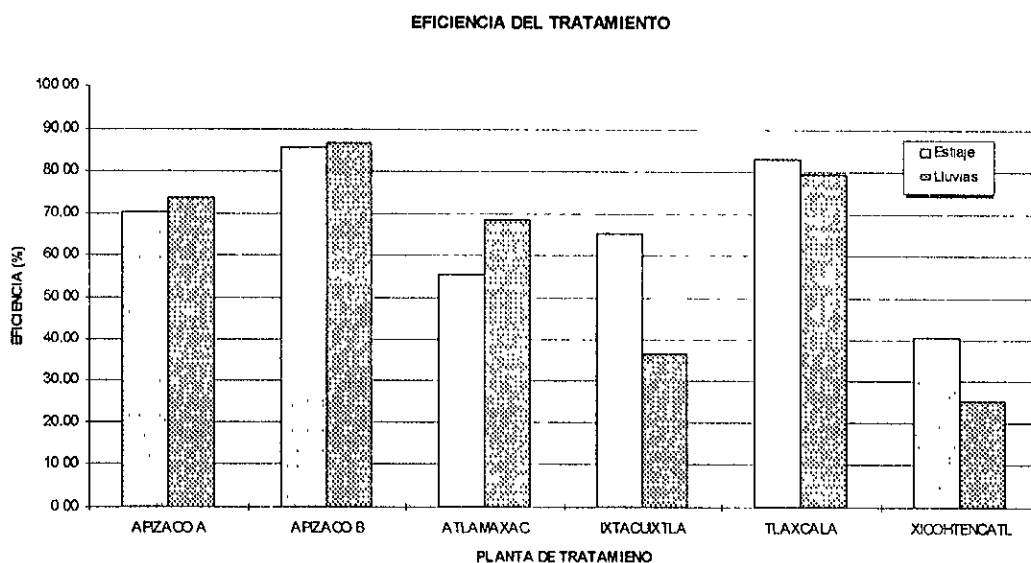


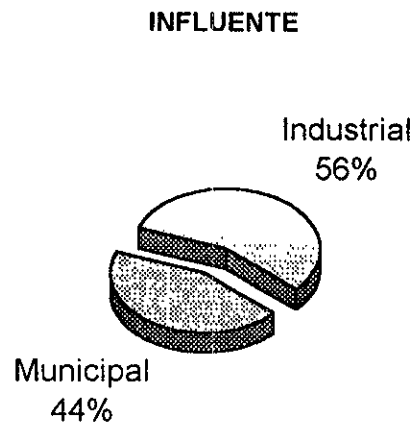
Tabla 4.4 Eficiencia del tratamiento a partir de SST

4.1.3 Planta de tratamiento seleccionada

La planta de tratamiento Tlaxcala se localiza en el municipio de Tlaxcala, ubicada en la población de San Hipolito Chimalpa, en un predio de forma irregular con una superficie de 70 800 m² y recibe aguas residuales de las localidades de Chiautempan, Chalma, Ixcotla, Atempan, Tizatlan, Tepectipac, Teotlalpan, Ocotelulco, Acxotla del río, Tlamahuco, Quiahuixtlan, colonia Adolfo López Mateos, y la Trinidad Chimalpa, por lo que se beneficia a una población

aproximada, de 46 000 habitantes y 72 industrias de diversos giros tales como: alimenticio, textil y de servicios (**Villaseñor, 1997**).

Actualmente, esta planta trata 140 l/s, teniendo una capacidad proyectada para 250 l/s. Las industrias que descargan sus aguas negras a la planta de tratamiento representan el 56% del total del gasto, mientras que el 48% esta comprendido por descargas de origen municipal.



Descripción del proceso.

El tipo de tratamiento que presenta la unidad Tlaxcala, es un sistema de lagunas aireadas mecánicamente y de maduración cuyo proceso depende de la forma en que se aproveche la degradación de materia orgánica que puede descomponerse por las bacterias y algas en un medio aéreo - facultativo. Este sistema presenta un funcionamiento de operación en serie de cuatro lagunas, las cuales trabajan con una alimentación por bombeo.

Esta planta cuenta con un sistema de pretratamiento, constituido por rejillas de control de materia flotante con la finalidad de proteger a los equipos de bombeo y evitar el taponamiento en las tuberías del sistema, dos canales desarenadores para remover las partículas que puedan causar abrasión a los equipos antes mencionados, así mismo, cuenta con un cárcamo de bombeo integrado por tres bombas centrifugas de tipo vertical con una potencia de 30 HP, las cuales se encargan de mantener constante el caudal del influente.

La entrada del agua hacia la primera laguna se realiza a través de la caja de alimentación, en esta laguna se encuentran instalados 4 aireadores tipo cañón, los cuales absorben oxígeno del medio ambiente inyectándolo hacia el fondo de la laguna, procurando darle dirección al agua con la finalidad de disminuir las zonas muertas en los vértices de la laguna.

En la segunda laguna operan 8 aireadores tipo cañón, con niveles de potencia suficientemente alta para mantener a los sólidos en suspensión y a la vez proporcionar oxígeno disuelto a través de todo el líquido, con el objeto de mejorar la calidad del agua residual.

Una vez que el agua ha pasado por la segunda laguna, ésta es transportada hacia una tercera equipada con dos aeradores, tipo tambor o de mezcla completa y por último, la cuarta laguna es de maduración, con el principal propósito de mejorar más aun el efluente así como disminuir la concentración de coliformes y sólidos suspendidos, sin embargo, debido al alto tiempo de retención y contenido de algas, la apariencia que presenta el efluente es de color verde. La distribución de las estructuras antes mencionadas se indican en la figura 4.2 (Anexo II), donde se observa el sitio de descarga del efluente tratado.

Características de diseño.

En la tabla 4.5 se muestran las principales características de la planta de tratamiento en estudio.

Características electromecánicas.

Para la operación de la planta de tratamiento, se requiere una potencia de 560 HP, debido a que cuenta con los siguientes equipos: subestación, transformadores, aeradores y bombas. A continuación se muestran las características de los equipos antes mencionados, tabla 4.6.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	DESARENADOR	REJILLAS	CARCAMO DE BOMBEO	
<i>Pretratamiento oriente</i>					
Largo	m	30.90	-	-	
Ancho	m	2.30	1.20	-	
Profundidad	m	1.40	-	5.20	
Altura	m	-	1.42	-	
Abertura entre barras	Pulg.	-	1.00	-	
Diámetro	m	-	-	4.80	
<i>Pretratamiento poniente</i>					
Largo	m	15.5	-	-	
Ancho	m	2.20	1.10	-	
Profundidad	m	1.35	-	6.00	
Altura	m	-	1.38	-	
Abertura entre barras	Pulg.	-	1.00	-	
Diámetro	m	-	-	3.80	
<i>Lagunas</i>					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	LAGUNA 1	LAGUNA 2	LAGUNA 3	LAGUNA 4
Largo	M	44	154	43	155
Ancho	M	90	90	118	118
Area	m ²	3 960	13 860	5 074	18 290
Tirante	M	2.56	2.63	2.58	2.0
Volumen	m ³	10 137.6	34 451.8	13 090.9	36 580
Tiempo de retención (140l/s)	Horas	20.16	72.24	25.92	72.48
Tiempo de retención (250 l/s)	Horas	11.26	40.56	14.64	1.69

(Villaseñor, 1997)

Tabla 4.5 Características de la Planta de Tratamiento de Tlaxcala

CANTIDAD	EQUIPO	CARACTERÍSTICAS
1	Sub. Eléctrica	Tipo compacta
1	Transformador	500 KVA con acoplamiento de alta y baja tensión utilizable para los equipos de aireación y las bombas del cárcamo de oriente.
1	Transformador	15 KVA utilizable en el alumbrado exterior de las lagunas.
1	Transformador	112.5 KVA se utiliza en el funcionamiento de las bombas del cárcamo poniente.
1	Transformador	45 KVA abastece energía eléctrica de oficinas y laboratorio.
4	Bombas	30 HP c/u, 3 instaladas en el cárcamo oriente y una en el cárcamo poniente.
12	Aereadores tipo cañón	30 HP, la potencia total es de 360 HP.
2	Aereadores tipo tambor	40 HP, la potencia total es de 80 HP.
1	Centro de control de motores	Consta de 14 arrancadores para cada aereador.

(Villaseñor, 1997)

Tabla 4.6 Características electromecánicas

4.1.4 Características del sitio.

El Estado de Tlaxcala se encuentra en la parte oriental del Altiplano Central Mexicano, que a su vez representa una unidad independiente del paisaje de la franja volcánica transversal Mexicana o eje neovolcánico transversal. Esta franja volcánica atraviesa la totalidad del territorio mexicano partiendo del Océano Pacífico hasta llegar al Golfo de México, en dirección oeste a este y está conectada con la actividad telúrica de la plataforma marítima de los "Cocos".

Los volcanes enfilados de occidente a oriente son: el Colima, el Tamitaro y el Nevado de Toluca; de la sierra nevada con: el Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Telapón, Tláloc, La Malinche, el Cofre de Perote, el Pico de Orizaba y el Volcán de Tuxtla.

Se calcula que los sedimentos más antiguos sean piedras calcáreas consistentes de carbonatos del cretacio superior, localizándolas, sobre todo, en la parte extrema oriental del estado, éstas son conocidas como "Formación de Tlaxcala por la magnitud de su aparición. Estas formaciones son elementos importantes y formativos de los suelos conocidos como rendzinas y los litosoles calcáreos. (Werner, 1992).

A continuación se realiza una descripción de las características del terreno contemplado para la realización de este proyecto.

Topografía.

Se realizaron visitas al lugar seleccionado para lograr obtener la información topográfica necesaria a contemplar durante la ejecución del proyecto; por otra parte, las características físicas, fisiográficas, suelos, grados de permeabilidad, geología y vegetación del sitio; fueron investigadas en la bibliografía correspondiente al estado de Tlaxcala.

Es importante que el terreno cuente con las vías de acceso y de comunicación adecuadas para realizar cualquier actividad relacionada con la recarga, otro factor importante a considerar es el de procurar que la fuente de abastecimiento del agua se sitúe cerca de la zona de recarga, con la finalidad de no incrementar el costo de la obra por este concepto.

El terreno destinado para la elaboración del proyecto está conformado en dos terrenos, uno de ellos queda situado dentro de la PTAR de Tlaxcala, mientras que la otra porción de terreno es propiedad privada, en la figura 4.3 se indican las características de los terrenos elegidos.

Terreno A.

Este predio queda comprendido dentro de la PTAR, y se encuentra cercado con malla de acero. Existe vegetación poco abundante (pasto), la cual tiende a desaparecer en época de estiaje. No presenta accidentes topográficos que puedan incrementar los costos de excavación, ni tampoco las características hidráulicas de diseño, además es de pendiente suave en dirección del *Terreno B*.

Las características geométricas del terreno se presentan a continuación:

$$A_A = 12810 \text{ m}^2 = 1.28 \text{ Ha} = 3.17 \text{ Acres}$$

$$P_A = 593 \text{ m}$$

Terreno B.

El predio está situado a un costado de la PTAR, siendo propiedad privada; en algún tiempo fue un campo de fútbol, pero actualmente es campo de labor. Presenta pendiente media atenuándose en dirección del río Zahuapan; no muestra accidentes topográficos que afecten el comportamiento hidráulico de la recarga, o que incrementen los costos de excavación y nivelación del terreno.

Este terreno está rodeado de otras propiedades, también privadas, por lo que hay terreno disponible en caso de que la obra requiera algún tipo de ampliación.

El levantamiento se realizó de forma simétrica al *Terreno A*, por lo que cuenta con las mismas propiedades geométricas que el terreno antes mencionado, las cuales se muestran a continuación:

$$A_B = 12810 \text{ m}^2 = 1.28 \text{ Ha} = 3.17 \text{ Acres}$$

$$P_B = 593 \text{ m}$$

Terreno B''

Esta zona al igual que el *Terreno B* es propiedad privada; presenta una zanja a lo largo de todo el predio la cual se usa como lindero entre el *Terreno A* y el *Terreno B*.

Dentro de Terreno B'' también se encuentran sembrados algunos árboles de edad media, los cuales no interfieren en la realización del proyecto. Dadas las dimensiones del predio, este presenta un área más pequeña, siendo la que a continuación se muestra:

$$A_{B''} = 1049.2 \text{ m}^2 = 0.10 \text{ Ha} = 0.26 \text{ Acres}$$

De acuerdo con las características topográficas se puede concluir que el terreno en general, cuenta con un área suficiente como para alojar en él todas las estructuras que sean necesarias para el correcto desarrollo del proyecto. Resultando un área total del sitio aprovechable de:

$$A_{\text{total}} = 26669.2 \text{ m}^2 = 2.67 \text{ Ha} = 6.59 \text{ acres}$$

$$P_T = 706.6 \text{ m}$$

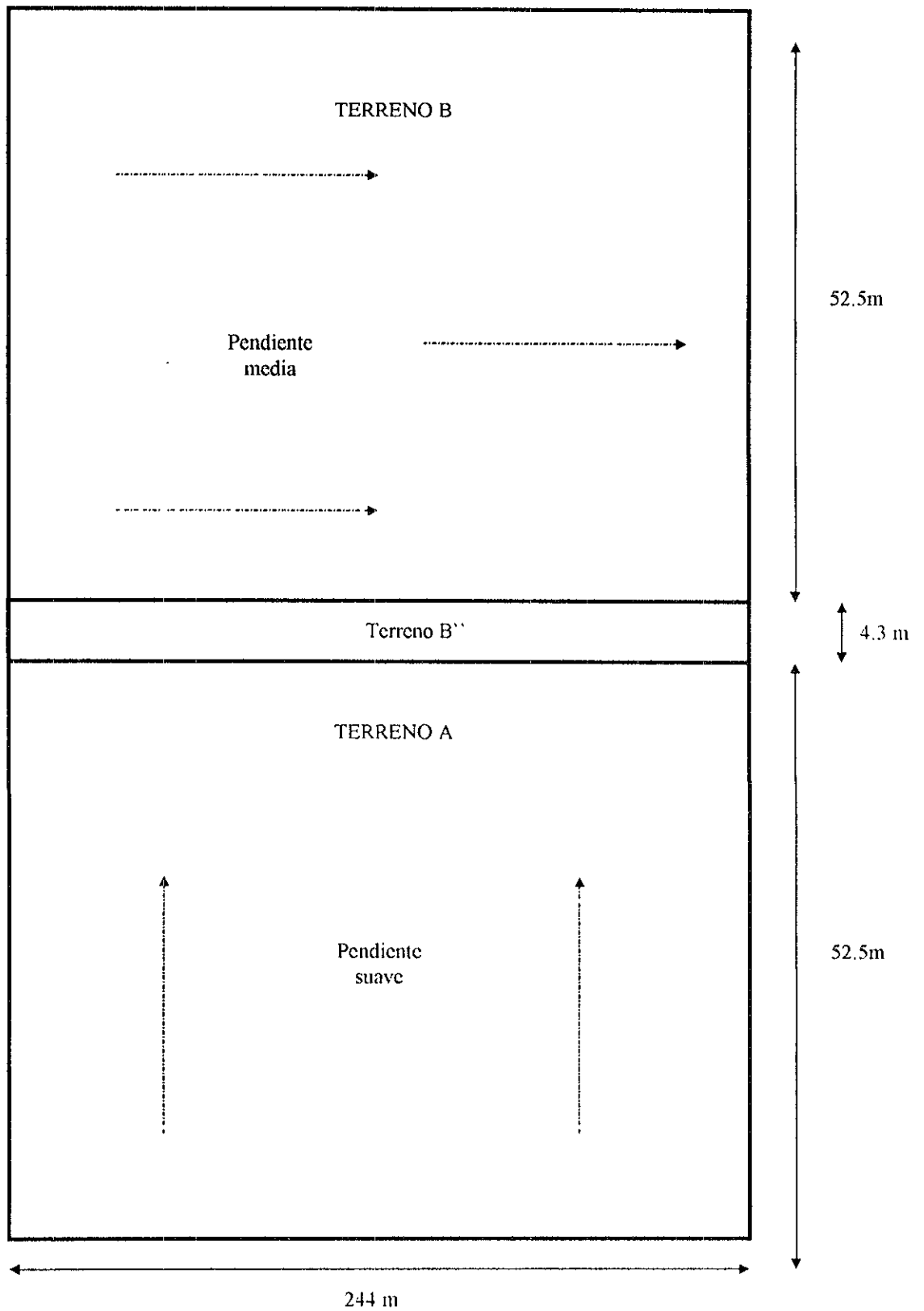


Figura 4.3 Terrenos disponibles para alojar la obra de recarga

La información que a continuación se menciona, fue obtenida de la Síntesis Geográfica del Estado de Tlaxcala, editado por el INEGI y la SPP, del año 1982, de donde se consultaron los planos correspondientes al tema de interés.

Fisiografía.

Según la clasificación del sistema de topoformas, el área está comprendida dentro de un valle.

Suelos.

Se cuenta con un suelo (Je/1) Fluvisol Eutrico de textura gruesa en los primeros 30 cm en la superficie del suelo.

Perfil representativo para Fluvisol Eutrico

Ubicación fisiográfica.

Provincia: Eje Neovolcánico

Subprovincia: Lagos y volcanes de Anáhuac.

Horizonte A1

Profundidad 0-5 cm. Color gris muy oscuro en húmedo, Separación de contraste clara y forma plana. Relación nula al HCL diluido. Textura: migajón arenoso. Consistencia friable en húmedo. Adhesividad nula, plasticidad nula. Estructura de forma laminar, tamaño muy fino y desarrollo débil. Porosidad escasa y constitución finamente porosa. Raíces muy finas frecuentes, raíces finas frecuentes, raíces medias escasas. Drenaje interno excesivamente drenado. Denominación del horizonte: ocrico.

Horizonte C11

Profundidad de 5-18 cm. Color gris muy oscuro en húmedo. Separación en contraste clara y forma plana. Reacción nula al HCL diluido. Textura migajón arenoso. Consistencia muy friable en húmedo. Adhesividad nula, plasticidad nula. Estructura de forma laminar, tamaño muy fino y desarrollo débil. Raíces muy finas frecuentes, raíces finas frecuentes, raíces medias escasas y raíces gruesas muy escasas. Drenaje interno excesivamente drenado.

Horizonte C12

Profundidad 18-37 cm. Color gris muy oscuro en húmedo. Separación de contraste clara y forma plana. Reacción nula al HCL diluido. Textura: migajón arenoso. Consistencia muy friable en húmedo. Adhesividad nula, plasticidad nula. Estructura de forma laminar, tamaño muy fino y desarrollo débil. Raíces muy finas escasas y raíces finas escasas. Drenaje interno excesivamente drenado.

En la tabla 4.7 se presentan los porcentajes de suelo correspondientes a cada horizonte.

HORIZONTE	% ARCILLA	% LIMO	% ARENA
A1	10	20	70
C11	10	24	66
C12	14	18	68

Tabla 4.7 Porcentaje de suelo para cada horizonte

Grados de permeabilidad.

Material no consolidado con posibilidad alta.

Geología.

Rocas sedimentarias y volcanosedimentarias;

Suelos aluviales del cuaternario, Q (al).

Rocas ígneas extrusivas

Terciario, toba intermedia, T (Ti).

Vegetación.

La vegetación de la zona está comprendida principalmente de agricultura de temporal.

Con base en los estudios realizados en el estado de Tlaxcala por el investigador alemán Gerd Werner, el tipo de suelo que comprende el área en estudio queda clasificado de la siguiente manera:

La clasificación del suelo coincide con la obtenida en la Síntesis Geográfica del estado de Tlaxcala, resultando así, un suelo del tipo Fluvisol (J).

Los fluvisoles son suelos, que según la clasificación de la FAO/UNESCO, parten de suelos con sedimentos aluviales poco desarrollados. Según la definición se entiende por *sedimentaciones aluviales* a los depósitos sedimentarios formados por corrientes fluviales en el cauce y llanura de inundación de los valles fluviales, que se caracterizan por una o más de las propiedades que se presentan a continuación:

- El contenido de sustancias orgánicas disminuye irregularmente según su profundidad o equivale a mayor de 35% a una hondura de 125 cm. a partir de la superficie. Una capa de arena podría contener menos, si debajo de ella existe una más fina.

- Generalmente tienen una cobertura con material Reciente/fresco e intervalos regulares y/o la existencia de una sedimentación fina.
- Presentan material sulfuroso en los 125 cm. superiores desde la superficie.

Los yacimientos diferenciales de fluvisoles en el estado de Tlaxcala se condicionan a las distintas regiones suministradoras del mencionado material. Dentro del estado estos depósitos también existen en la cuenca de Tecamachalco/Ayotempan de Apan-Muños-Tlaxco, y por último alrededor del volcán la Malinche.

Se tomó en cuenta la proposición de *Aepelli & Schoenhals, 1975*, de dividir estos suelos según su textura. La subdivisión contempla seis categorías de textura desde finos hasta gruesos, en la tabla 4.8 se localizan las subunidades a las que llegó el autor.

Categoría	Características
J1	Consistentes de migajón arcilloso a arcilla limosa
J2	Consistentes de migajón limoso a migajón arcilloso
J3	Consistentes de franco arenoso a migajón franco arenoso
J4	Consistente de arena limosa
J5	Consistente de arena gravosa (localmente migajas)
J6	De grava arenosa

Tabla 4.8 Categorías del suelo según Aepelli & Schoenhals

Además de las ya mencionadas 6 subunidades se estableció una con textura no especificada, tratándose de fluvisoles consistentes de sedimentos coluviales al pie de la ladera, en ranuras y en depresiones, y asignando a las mismas el nombre de fluvisoles J7, y otra adicional (fluvisol J8) que se encuentra con fondo poco profundo, consistiendo de material arenoso-limoso.

Para identificar a cual de las seis subunidades pertenece el suelo de la zona en estudio, se localizó la zona en los mapas de suelos contenidos en la bibliografía

editada por el autor alemán antes mencionado. El tipo de suelo que predomina en la zona es clasificado como *Fluvisoles arenosos migajosos limosos (J3)*.

Estos suelos están compuestos de sedimentos recientes fluviales y localmente coluviales, limo arenoso, migajoso a migajón arenoso limoso, localmente contiene carbonatos. Los sedimentos coluviales son detritos rocosos producto del intemperismo, desplazados ladera abajo por la acción de la fuerza de la gravedad y se depositan en las laderas, el tamaño de los detritos es variable, son angulosos y sin clasificación (**Diccionario Geomorfológico, 1989**).

Dentro de esta unidad aparecen los fluvisoles J2 y J4 así como gleysoles G3. conjuntamente con los fluvisoles J4 es la unidad más frecuente entre los fluvisoles, que se encuentran en todas las cuencas del área de investigación, así como al pie de las laderas de la Malinche y de la Sierra Nevada.

4.1.5 Características geohidrológicas del estado de Tlaxcala.

Los ríos Atenco, Zahuapan y Atoyac son los tres cauces principales que se localizan en el estado, estos ríos abastecen agua a las comunidades que los circundan, y es utilizada en actividades agrícolas y de abrevadero principalmente; la distribución geográfica de estos ríos se muestra en la figura 4.4 (Anexo II), (**Domínguez, 1997**).

La corriente más importante en el estado es el Río Zahuapan, este nace en la serranía de Tlaxco cerca de los límites de Puebla y Tlaxcala, descendiendo del cerro del Peñón del Rosario. Aguas abajo su caudal es almacenado en la presa San José Atlanga. A partir de aquí su dirección predominante es hacia el sur hasta unirse con el Río Atoyac en la zona límite del estado de Tlaxcala y Puebla, para continuar su recorrido hasta la presa Manuel Avila Camacho.

Desde el punto de vista geohidrológico y tomando en cuenta la fisiografía de Tlaxcala, la recarga de aguas subterráneas es captada por cuatro acuíferos,

siendo su principal aportación a través de La Malintzi, así como la Sierra de Taxco y de las Animas en la parte norte y noreste, mientras que en la parte suroeste el agua es captada por la Sierra de Nanacamilpa, originándose ahí las mayores precipitaciones. En la figura 4.5 (Anexo II), se localizan las áreas de influencia y las zonas de sobreexplotación de los acuíferos que a continuación se mencionan, (Domínguez, 1997):

Acuífero Atoyac-Zahuapan.

Está considerado como el primero en orden de importancia, representa el 51.89 % de la superficie estatal (3914 km²). Este acuífero forma parte de la cuenca del Río Atoyac y queda comprendido dentro de la subcuenca Alto Balsas.

En este acuífero predominan los pozos para uso agrícola (220), público-urbano (216), comercial y de servicios (108), industrial (104), y doméstico abrevadero (40). La dirección del flujo subterráneo es de norte a sur, es decir, lleva la misma dirección del Río Zahuapan. El fenómeno de sobreexplotación se hace presente en este acuífero.

Acuífero Huamantla.

Es considerado el segundo acuífero en orden de importancia representa el 24.79% con respecto a la superficie total del estado, este acuífero forma parte de la subcuenca cerrada Libres Oriental, que la conforman los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz. Al igual que el acuífero *Atoyac-Zahuapan*, este también presenta problemas de sobreexplotación.

En este acuífero predominan los pozos para uso agrícola (189), público urbano (55), doméstico abrevadero (48), industrial (3) y comercial (2).

Acuífero Soltepec.

Está considerado como el tercero en orden de importancia, representa el 18.8 % del territorio estatal, forma parte de la cuenca del Río Moctezuma y dentro del estado pertenece a la subcuenca Av. de Pachuca.

Los usos que se le dan a los pozos contenidos en este acuífero son para las actividades agrícolas (58), público-urbano (25) e industrial (4), la dirección del flujo subterráneo es de sureste a noreste.

Acuífero Emiliano Zapata.

Se ubica al noroeste del estado de Tlaxcala y representa el 4.52 % de la superficie del estado y se ubica dentro de la subcuenca Tecolutla. Las subcuencas que conforman al estado se muestran en la figura 4.6 (Anexo II), en la figura también se indican las características de cada una.

En el estado de Tlaxcala afloran rocas de origen sedimentario y metamórficas que van del oligoceno al reciente, e igneas andesíticas basálticas en forma de derrames y tobas volcánicas alteradas, dando lugar a la formación de horizontes geológicos cuya clasificación en forma general se da por acuífero. En los siguientes párrafos se describe la geología perteneciente a los acuíferos antes mencionados.

Geología del acuífero Atoyac-Zahuapan.

La zona norte está constituida por tobas mal clasificadas aflorando y por derrames andesíticos basálticos. La zona centro está formada por derrames basálticos andesíticos, aflorando en Apizaco y Tetela, así como tobas mal clasificadas y derrames basálticos andesíticos a mayor profundidad. Dentro de la zona sur se localizan arenas, limos, arcillas, tobas mal clasificadas y derrames basálticos andesíticos a mayores profundidades principalmente en el valle de Nativitas-

Zacatelco. La zona oeste está constituida por limos, arcillas, arenas rocas metamórficas de origen calizo y derrames basálticos andesíticos, dando lugar a formaciones de depósitos lacustres en la parte noroeste de Panotla, (Domínguez, 1997).

Geología del Acuífero Huamantla.

Geológicamente está constituido por tobas mal clasificados, arenas, limos arcillas y derrames andesíticos-basálticos a mayores profundidades.

Geología del Acuífero Soltepec.

Constituido geológicamente por tobas mal clasificadas, arenas limos, arcillas y derrames andesíticos-basálticos a mayor profundidad.

Geología del Acuífero Emiliano Zapata.

Este acuífero queda constituido por tobas mal clasificadas aflorantes y derrames andesíticos-basálticos.

4.2 Calidad del agua subterránea.

Los avances tecnológicos de los últimos años constituyen un factor importante que ha hecho posible la explotación en gran escala de los almacenamientos subterráneos, ya que éstos constituyen la mayor fuente de agua dulce almacenada que se dispone en la tierra.

En el pasado, los conocimientos que se tenían sobre la composición y comportamiento de las aguas subterráneas no solo eran escasos sino frecuentemente falsos. Se tenía la idea de que el agua era algo oculto y misterioso que requería el empleo de prácticas casi mágicas para su exploración.

Actualmente se han desarrollado métodos útiles y eficaces para la investigación hidrológica y la explotación hidráulica del recurso subterráneo.

Las características fisicoquímicas naturales del agua son determinadas por dos tipos de procesos fundamentales: uno está relacionado con el comportamiento de los *minerales y elementos metálicos* en un medio acuoso, y el otro relacionado con la influencia del medio ambiente, **(CNA, 1994)**.

Factores Ambientales.

Entre los factores ambientales dominantes se encuentra el clima, el cual actúa en diversas formas: influye en la meteorización de las rocas y en la formación de suelos, controla las características de la cobertura vegetal y, en consecuencia, determina la composición química del agua que fluye de manera superficial y subterránea. Algunos constituyentes mayores son más afectados por los efectos climáticos, tales como el sulfato, cloruro y bicarbonato; por ejemplo el bicarbonato predomina en regiones de climas húmedos, templados o cálidos, donde prolifera la vegetación.

Debido a que la temperatura de las rocas aumenta con la profundidad, el agua que circula en estratos muy profundos se encuentra más caliente que cuando fluye cerca de la superficie. Las temperaturas elevadas incrementan la solubilidad de los minerales, es por eso que la concentración de sales en las aguas termales profundas suele ser mucho mayor que en aguas someras. La Faja Neovolcánica Transmexicana constituye un ejemplo de lo anterior, ya que presenta una elevada salinidad en algunos manantiales termales localizados dentro de esa zona.

Mineralogía.

La corteza terrestre es la fuente principal de los elementos disueltos en el agua subterránea: la composición mineralógica, textura y estructura de las rocas,

determinan la composición química del agua que circula a través de ellas. Por lo general, la concentración de sales en el agua subterránea es mayor que en la superficial, debido a que aquella permanece más tiempo de contacto con las rocas.

Las características químicas del agua también son controladas por factores bioquímicos, asociados con los procesos de vida de las plantas y animales. En este sentido, en la composición natural del agua influyen numerosos factores y procesos de los ecosistemas, como son:

- Fotosíntesis,
- Metabolismo (de los seres vivos),
- Reacciones químicas, etc.

Sin embargo, en el agua subterránea, la influencia de estos factores es mucho menor, dado que la actividad biológica en el subsuelo es menos importante que en la superficie. Otro factor importante que determina la composición natural del agua, es el movimiento de la misma, ya que toda ella se encuentra en continua circulación dentro del ciclo hidrológico, pues su larga permanencia en contacto con las rocas propicia diversos procesos y reacciones química, las cuales se traducen en sales disueltas y pueden afectar su aptitud para los diferentes usos.

Pozos de muestreo en la zona de recarga.

La composición del agua se determina con el análisis de los parámetros físicos y químicos, a través de la colección de muestras. Los estudios de la calidad del agua subterránea deben tener dos objetivos generales:

- Proporcionar información representativa de la composición química de la masa de agua,
- Aportar información acerca de la variación de esas características en el tiempo.

Cuando el caso así lo requiera, los propósitos específicos del estudio en turno deben ser establecidos con la mayor claridad posible.

El alto costo de los pozos diseñados especialmente para el monitoreo, han conducido a la utilización de pozos de bombeo como sitios de muestreo. Los pozos de bombeo comúnmente son puntos obligados de muestreo, desafortunadamente presentan algunas limitaciones, siendo algunas de ellas que captan agua de diferente calidad procedente de varios estratos y la mezclan en su interior. Por lo que el agua muestreada es una medida de su composición en toda la sección que abarca el pozo, pero solo es representativa, cuando sus características son relativamente homogéneas.

Cuando se pretenda elaborar un proyecto de recarga artificial de acuíferos, es de gran importancia conocer las características del agua del acuífero que se va a recargar, ya que es la base para determinar la calidad que deberá tener el agua destinada para la recarga. Para la realización de este trabajo se logró obtener información referente a la calidad del agua subterránea del acuífero. Se localizaron aquellos pozos que se encuentran en la periferia de la zona destinada para el proyecto con el objetivo de poder obtener muestras que indiquen el comportamiento de la calidad del agua antes, durante y después de la recarga.

En la tabla 4.9 se presentan aquellos pozos que pueden ser utilizados para realizar cualquier tipo de muestreo; cabe señalar que se escogieron los que pertenecen al acuífero *Atoyac-Zahuapan* donde se localiza el proyecto en estudio, **(Dominguez, 1997)**.

La información obtenida cuenta con datos hidráulicos de profundidad, nivel estático, nivel dinámico, gasto, cuenca y subcuenca a la que pertenece el pozo, y el acuífero en el que está situado. Son un total de ocho pozos, de los cuales siete son destinados al abastecimiento de agua potable, y tan solo uno es usado con fines agrícolas.

DATOS HIDRAULICOS

(27 marzo de 1996)

POZO	NOMBRE	USO	PROF. (m)	N. ESTATICO (m)	N. DINAMICO (m)	GASTO (lps)	CUENCA	SUBCUENCA	ACUIFERO
1	PANOTLA 2	POTABLE	100	13.9	15	33	A	Z	A-Z
2	OCOTLAN	POTABLE	100	15	78.2	6	A	Z	A-Z
3	TEPEHITEC	AGRICOLA	130	47.2	55.1	1.2	A	Z	A-Z
4	STA. MA. IXTULCO	POTABLE	87	11	19	6	A	Z	A-Z
5	LA JOYA	POTABLE	100	-	-	29.35	A	Z	A-Z
6	LOMA BONITA	POTABLE	150	-	-	30 921	A	Z	A-Z
7	CENTRO EXPOSITOR	POTABLE	200	9	17	30 399	A	Z	A-Z
8	CBTYS	POTABLE	125	-	-	19 629	A	Z	A-Z

(CNA, 1997)

(A) RIO ATOYAC
 (Z) RIO ZAHUAPAN
 (A-Z) ATOYAC-ZAHUAPAN

Tabla 4.9 Pozos ubicados en la periferia de la planta de tratamiento de Tlaxcala

Así mismo, se muestra la caracterización de cada pozo, y a su vez se comparan los parámetros obtenidos con la NOM-127-SSA1-1996. El objetivo de esta comparación es con la finalidad de corroborar si la calidad del agua subterránea es potable. En el Anexo III se muestra la caracterización de los pozos estudiados.

Resultados:

La calidad del agua de cinco de los pozos muestreados cumplieron satisfactoriamente con los límites de calidad establecidos en la NOM-127-SSA1-1996, ya que los valores de la caracterización resultan inferiores a los estipulados en la norma. Los pozos son: Panotla 2, Ocotlan, Sta. Maria Ixtulco, Centro expositor y CBTyS. Por el contrario, solo la calidad del agua de tres pozos no cumplen con lo establecido en la norma ya mencionada, y a continuación se discuten.

El primero de ellos es el llamado Loma Bonita, el cual presenta un número mayor de coliformes fecales y totales al permitido en la norma para agua potable. Razón por la cual el agua de este pozo no puede considerarse potable

Otro de ellos es el conocido con el nombre de La Joya, este pozo presenta un valor de pH fuera del intervalo recomendado en la norma.

Un tercer pozo que se utiliza para riego es Tepehitec, presenta un valor alto de nitratos.

En general los resultados indican que la calidad del agua subterránea del acuífero a recargar es potable, lo que obliga a que la calidad del agua destinada para la recarga sea de mejor o igual calidad a la del acuífero.

4.3 Remoción de contaminantes a través del suelo

Muchos proyectos usan el suelo y el acuífero como un método de tratamiento alternativo para mejorar la calidad de las aguas residuales. A este proceso se le conoce como tratamiento suelo-acuífero (SAT). Una ventaja adicional que presentan estos sistemas, es que permiten el almacenamiento temporal del agua recargada en el acuífero (CEPIS, 1994).

La capacidad de tratamiento en el terreno puede ser limitada y depende de su constitución, de la calidad inicial y composición del agua de recarga (Custodio, 1976).

Existen diversos procesos en la naturaleza que actúan de forma similar a los utilizados en las plantas de tratamiento, tales como: la sedimentación, filtración, transferencia de gases, adsorción, intercambio iónico, precipitación química, oxidación, descomposición biológica, etc. Los procesos naturales que contribuyen al tratamiento del agua residual son la fotosíntesis, foto-oxidación y la asimilación por parte de las plantas; estos procesos se llevan a cabo con velocidades naturales y tienden a realizarse en forma simultánea dentro de un único reactor-ecosistema.

Los sistemas de tratamiento natural se clasifican como a continuación se describen (Metcalf, 1985):

Sistemas de aplicación al terreno.

- Sistemas de baja carga,
- Sistemas de infiltración rápida,
- Sistemas de riego superficial.

Sistemas acuáticos.

- Terrenos pantanosos naturales y artificiales,
- Sistemas de tratamiento mediante plantas acuáticas.

Sistemas de aplicación al terreno.

Sistemas de baja carga.

Estos sistemas son considerados como el proceso de tratamiento natural de uso más común, implican la aplicación del agua residual sobre un terreno con vegetación para conseguir, tanto el grado necesario de tratamiento como el crecimiento de la vegetación existente. El tratamiento del agua residual se produce conforme el agua se infiltra en el terreno.

Sistemas de infiltración rápida.

En estos sistemas el agua residual debe recibir un tratamiento previo a la infiltración, el agua es aplicada en forma intermitente y generalmente se usan balsas de infiltración para la disposición del agua residual. El potencial del tratamiento de los sistemas de infiltración rápida resulta ser inferior, en algunas ocasiones, a los sistemas de baja carga debido a la menor capacidad de retención de los suelos permeables aunado a las mayores cargas hidráulicas empleadas.

Riego superficial.

El agua residual se distribuye en la zona superior de terrenos con vegetación, estos sistemas suelen emplearse en emplazamientos con suelos o estratos subsuperficiales relativamente impermeables. Cabe señalar que estos procesos suelen adaptarse a diferentes permeabilidades. La principal desventaja que

presentan estos sistemas, es la pérdida de agua por evaporación, la cual depende del clima de la zona y de la estación del año.

Sistemas acuáticos.

Para el tratamiento del agua residual se han empleado terrenos pantanosos naturales y artificiales, siendo los primeros aquellos que presentan más limitaciones tal como se describe a continuación.

Terrenos pantanosos naturales

De acuerdo con la legislación ambiental, los terrenos pantanosos son considerados como cuerpos receptores de agua, obligando así al tratamiento secundario o avanzado de las aguas a verter.

Terrenos pantanosos artificiales.

Presentan ventajas adicionales, en comparación con los pantanos naturales, una de ellas es que no están sujetos a las limitaciones de vertidos. Existen dos clasificaciones de los terrenos pantanosos artificiales desarrollados para el tratamiento de agua residual, el primero de ellos es el de *Flujo libre* y suelen consistir en balsas o canales paralelos. El otro tipo es de *Flujo subsuperficial*, consisten en canales o zanjas con fondos relativamente impermeables acompañados de vegetación emergente.

Sistemas de tratamiento mediante plantas acuáticas.

Los sistemas de plantas acuáticas flotantes, son conceptualmente similares a los sistemas de terrenos pantanosos de flujo libre, excepto por el hecho de que emplean especies de plantas flotantes como los jacintos de agua y lentejas de agua (**Metcalf, 1985**).

El flujo de las aguas residuales a través del subsuelo, la zona saturada y el acuífero mejora su calidad. Los suelos naturales atenúan en forma activa muchos (pero no todos) contaminantes y por ello son considerados como un sistema efectivo para el tratamiento de aguas residuales. Las variaciones en los mecanismos de recarga y tasa de infiltración ejercen una influencia importante en la eficiencia de los procesos bioquímicos de autopurificación y esto debe tenerse en cuenta cuando se evalúan los efectos de la recarga de aguas residuales en los acuíferos. En términos generales, cuanto más lenta y más intermitente es la infiltración, más efectivos resultan ser los procesos de autopurificación.

Las zonas más activas para la atenuación y eliminación de contaminantes son el mismo subsuelo y la zona no saturada. Los procesos continúan en menor grado, a mayor profundidad, especialmente cuando sedimentos no consolidados se encuentran presentes. Adicionalmente, la dispersión hidrodinámica que acompaña el flujo de agua subterránea causará una dilución de contaminantes persistentes y móviles, en la zona saturada de acuíferos. En la figura 4.7 se observan los procesos que favorecen la atenuación de contaminantes en el subsuelo y su actividad relativa en el suelo, la zona no saturada y la saturada.

Zona no saturada

Esta zona es muy importante debido a su posición la cual resulta estratégica, ubicada entre la superficie de la tierra y el nivel freático, y debido a que su ambiente normalmente es más favorable para la atenuación y eliminación de los contaminantes. El movimiento del agua en la zona no saturada es lento y se limita a los poros más pequeños existiendo así un mayor potencial para lo que a continuación se menciona (**Custodio, 1976**):

- La filtración, sorción y eliminación de las bacterias así como los virus.
- La atenuación de los metales pesados, y otros químicos inorgánico, a través de la precipitación (como carbonatos, sulfuros o hidróxidos), sorción o intercambio de cationes.
- La sorción y biodegradación de hidrocarburos y algunos compuestos sintéticos orgánicos.

El movimiento del agua en la zona no saturada puede ser complejo y es difícil predecir su capacidad para atenuar contaminantes. En muchos casos, el grado de atenuación depende del tiempo de residencia, que a su vez se determinan por sus características hidráulicas. Por lo regular la tasa de flujo natural en la zona no saturada en casi todas las formaciones generalmente no rebasa los 0.2 m/d, sin embargo, la tasa puede aumentar cuando se realiza la recarga artificial debido al incremento de la carga hidráulica. La eliminación de contaminantes también depende de los siguientes factores:

- * Mineralogía del suelo. Esto es importante debido a que los minerales arcillosos pueden adsorber metales pesados, fosfatos, amonio y virus y la materia orgánica podrá retener muchos contaminantes orgánicos
- * Profundidad del nivel freático. Cuando los acuíferos se encuentran a gran profundidad los periodos de infiltración son más prolongados ocasionando una mayor atenuación de contaminantes en la zona no saturada. De acuerdo con la AWRC, 1982 la profundidad mínima del nivel freático para la recarga de acuíferos es de 3 m, pero si la profundidad de la zona no saturada es de 10 m de espesor se puede alcanzar una autopurificación óptima (**Montgomery, 1984**).
- * Estratificación. Durante el proceso de infiltración la estratificación de sedimentos ocasiona la formación de acuíferos colgados los cuales restringen una mayor recarga y causar un movimiento lateral.

- * **Topografía.** Debe considerarse en sitios donde se tenga el nivel freático medianamente profundo, debido a que un incremento en el nivel freático puede ocasionar que las aguas parcialmente tratadas surjan en la superficie de la tierra.

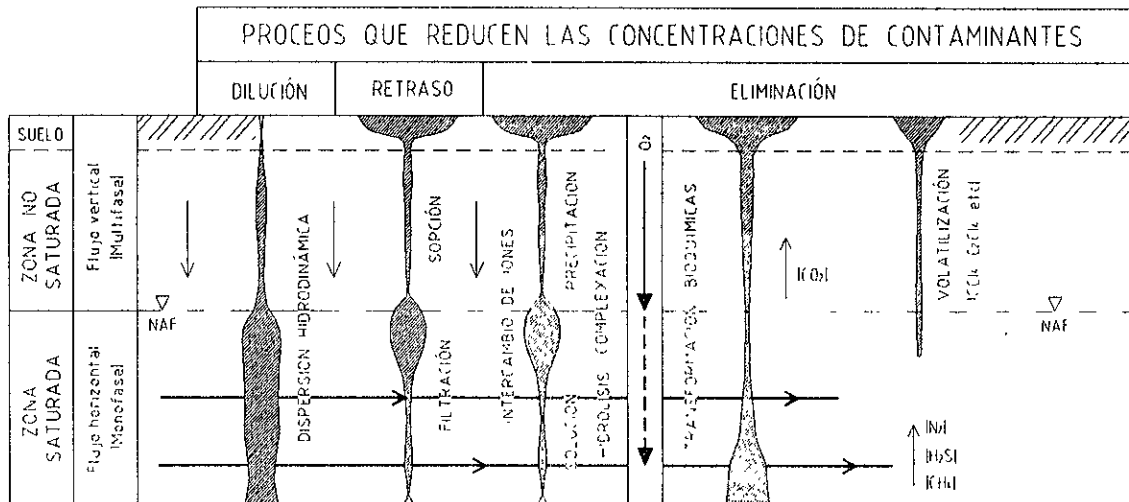


Figura 4.7 Procesos que favorecen la atenuación de contaminantes en el subsuelo.

Zona saturada

Esta zona presenta un ambiente más estable en comparación con la *zona no saturada*, esto es, debido a que hay niveles más bajos de oxígeno y los efectos de dilución se presentan en mayor escala. Se presenta remoción de fósforo, potasio, sodio, metales pesados y virus, aunque en menor cantidad que la *zona no saturada* (Custodio, 1976).

Los suelos son capaces de eliminar, hasta cierto punto gran parte de los contaminantes del agua residual tal como: sólidos suspendidos, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, metales pesados, compuestos orgánicos y microorganismos.

Los procesos que intervienen en la eliminación de los mismos se presentan a continuación (Metcalf, 1985):

Sólidos suspendidos

Los sólidos suspendidos se eliminan principalmente por filtración en el terreno o en el medio superficial, aunque la contribución de los fenómenos de sedimentación puede ser importante durante la aplicación del agua residual a las balsas de infiltración rápida.

Materia orgánica

La materia orgánica degradable presente en el agua residual es eliminada por degradación microbiana. Los microbios responsables de esa degradación suelen estar asociados a películas que se desarrollan sobre la superficie de las partículas del suelo, vegetación y desechos vegetales.

Nitrógeno

Los mecanismos implicados en la eliminación de nitrógeno del agua residual dependen de la forma en que este presente el nitrógeno (nitratos, amoníaco o nitrógeno orgánico). El nitrógeno suele presentarse en forma de amoníaco o de nitrógeno orgánico

Nitrógeno orgánico

El nitrógeno orgánico está asociado a los sólidos suspendidos presentes en el agua residual, por lo que su eliminación se logra mediante sedimentación y filtración; parte del nitrógeno orgánico se hidroliza para formar aminoácidos que se pueden descomponer para formar iones amonio (NH_4).

Nitrógeno amoniacal

Dentro de los sistemas de tratamiento natural el nitrógeno amoniacal puede descomponerse en dos formas: el amoniaco soluble se elimina por volatilización directa a la atmósfera en forma de amoniaco gas; mientras que el amoniaco absorbido es apto para el consumo por la vegetación y microorganismos o para la conversión a nitrógeno en forma de nitratos mediante nitrificación biológica en condiciones aerobias.

Nitrógeno en forma de nitratos

La vegetación puede asimilar los nitratos, pero ello solo se produce en las proximidades de las raíces durante los periodos de crecimiento activo, si no se elimina por el consumo de las plantas o procesos de desnitrificación, el nitrato lixiviará o percolará alcanzando a las aguas subterráneas.

Fósforo

La adsorción y precipitación química son los principales procesos de eliminación del fósforo, la vegetación también es capaz de remover parte del fósforo presente. El grado de eliminación del fósforo depende del grado de contacto entre el agua residual y la matriz de suelo.

Metales pesados

Su eliminación se produce principalmente por el mecanismo de sorción (adsorción y precipitación) y en menor grado, las plantas pueden asimilarlo. La capacidad de retención de metales de muchos suelos suele ser elevada, especialmente cuando el suelo tiene un pH mayor a 6.5. Los rendimientos de remoción suelen situarse entre el 80 y 95 por ciento.

Compuestos orgánicos

Estos compuestos se eliminan por volatilización y adsorción seguidas de degradación biológica o fotoquímica. El suelo permite eliminar una fracción importante de los compuestos orgánicos de traza; sin embargo, los datos de que se dispone no permiten determinar los rendimientos de eliminación.

Microrganismos

Existen diferentes mecanismos para la eliminación de las bacterias y parásitos, estos incluyen la muerte, retención, sedimentación, atrapamiento, depredación, radiación, desecación y adsorción. Los sistemas que contemplan el flujo del agua residual a través del terreno, permiten la eliminación completa de los microorganismos del agua infiltrada; en suelos con textura media a fina la eliminación total de microorganismos se logra con 1.5 m de infiltración, mientras tanto, para los sistemas de infiltración rápida se necesitan mayores distancias de transporte. **(Metcalf, 1985)**.

4.3.1 Mejoramiento de la calidad del agua residual destinada para la recarga.

En este apartado se presenta un análisis de aquellas alternativas que deberán practicarse al agua destinada para la recarga, antes de que se realice la infiltración, con la finalidad de garantizar que el agua recargada sea de igual calidad a la subterránea, también se consideran las propiedades que presentan los suelos, como medio natural, para tratar aguas residuales.

Uno de los principales problemas que presenta la recarga artificial es la colmatación del suelo, efecto provocado por la alta concentración de partículas suspendidas en el agua, lo cual ocasiona una disminución en la permeabilidad del terreno. La cantidad de materia orgánica presente en un agua residual también

suele incrementar los problemas de colmatación, y a su vez la existencia de agentes patógenos que pueden afectar la salud humana.

El objetivo del pretratamiento es reducir el sellado del suelo por obturación de los poros del mismo, y así evitar la aparición de condiciones desagradables (olores) durante las fases de almacenamiento o aplicación del agua residual. Es importante tener bien establecidos los objetivos del sistema de recarga, ya que el nivel de pretratamiento depende de los antes mencionados.

El mínimo nivel de pretratamiento recomendado para los sistemas de recarga por superficie es el tratamiento primario u otra forma de tratamiento equivalente. Existen sistemas cuyo objetivo primordial es trabajar con la mayor carga hidráulica posible razón por la cual se recomienda un nivel de tratamiento secundario o avanzado. Dado que uno de los objetivos del proyecto del estado de Tlaxcala es infiltrar una cantidad considerable de agua, se eligió una planta de tratamiento con niveles secundarios de tratamiento. No suele ser necesario utilizar procesos de desinfección del agua residual que será infiltrada, ya que se ha podido comprobar en numerosos estudios que los sistemas de infiltración rápida son muy eficientes en la eliminación de bacterias patógenas. Por otra parte con la finalidad de evitar la formación de hidrocarburos clorados es conveniente no clorar el agua residual antes de los procesos de infiltración rápida, **(Custodio, 1976)**.

Aunque la eficiencia de la planta de tratamiento elegida refleja un buen funcionamiento, tal eficiencia puede ser incrementada tomando en cuenta las siguientes alternativas:

- Mantenimiento de la planta de tratamiento en general,
- Identificación de los procesos unitarios de tratamiento que no cumplan con las eficiencias establecidas en el diseño inicial.

- Implantación de nuevos procesos unitarios de tratamiento para la obra de recarga con la finalidad de eliminar materia orgánica y sólidos suspendidos presentes en el agua.

Dentro de los procesos unitarios se puede considerar la construcción de un desarenador o un filtro de flujo ascendente para la eliminación de partículas suspendidas y a su vez materia orgánica.

4.4 Método de recarga seleccionado

En el apartado 3.3 *selección del método de recarga*, se mencionan aquellos aspectos que deben considerarse para construir una obra de recarga, el primero de ellos menciona la existencia de sitios y zonas permeables para lograr la infiltración del agua de recarga, en el estado de Tlaxcala se presentan zonas con buena permeabilidad, la zona donde se ubica la planta de tratamiento seleccionada además de contar con el área suficiente para alojar una obra de recarga artificial, cuenta con índices de permeabilidad satisfactorios para lograr una buena infiltración.

La planta de tratamiento dotará un gasto suficiente para lograr volúmenes de infiltración altos. De acuerdo con lo anterior las balsas de infiltración son el método que más se ajusta a las condiciones topográficas y geográficas del sitio. Otra razón es, que este tipo de obra requiere un mantenimiento mínimo, el cual se describe con mayor detalle en el capítulo 5.

5

PROPUESTA DE DISEÑO DEL MÉTODO DE RECARGA

En este capítulo se analizan los aspectos que deben tomarse en consideración para proponer el diseño y la operación adecuada de la obra de recarga a desarrollar.

5.1 Aspectos hidráulicos de la recarga artificial.

Para la recarga artificial por medio de balsas, que es el caso en estudio, domina inicialmente el flujo de tipo vertical, hasta que llega al nivel freático a partir del cual domina el horizontal. Es por ello que es importante conocer el grado de anisotropía y estratificación de los materiales.

Durante el flujo vertical a través de la zona no saturada se presenta una remoción importante de diversos contaminantes debido a los procesos de intercambio catiónico, sorción y filtración.

La velocidad o tasa de recarga (caudal introducido por unidad de superficie) está limitado por las condiciones hidráulicas del material poroso que se encuentra en la zona de recarga: porosidad, permeabilidad, posición del nivel freático, movimiento del agua, etc. La existencia de estratos impermeables o semipermeables entre el nivel del terreno y el nivel freático cuando se realiza la recarga desde la superficie, puede originar niveles suspendidos que dificultan la recarga.

A continuación se describen las principales características del subsuelo que intervienen en la eficiencia de la recarga, (Iturbe, 1992).

Porosidad

Los espacios no ocupados por el material sólido pueden llenarse con agua o aire, y si el suelo está saturado esos espacios son ocupados únicamente por agua. A estos espacios se les conoce como intersticios o poros por los que fluye el agua. La porosidad de un suelo (n), es la medida de los intersticios que este contiene y se expresa como la relación del volumen de vacíos (V_v), entre el volumen total (V_t), de la siguiente forma:

$$n = \frac{V_v}{V_t} \times 100$$

Contenido de agua y grado de saturación

Se define como la cantidad de agua que tienen los intersticios o poros del suelo; tal contenido puede expresarse con base en la masa del agua o en su volumen. El primer caso se define como la relación de la masa del agua entre la masa de la

fracción sólida y se denomina contenido absoluto de agua, de donde se deduce la siguiente fórmula:

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

donde: W contenido de agua en porcentaje
 W_w masa del agua contenida en los vacíos del suelo (m)
 W_s masa de los sólidos (M)

Por otra parte el contenido de agua en fracción volumétrica se define como la relación del volumen del agua ocupado por los vacíos de una muestra de suelo (V_w), entre el volumen total de la muestra (V_t):

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \times 100$$

El contenido de agua se obtiene prácticamente determinando las densidades del suelo y del agua mediante la relación que a continuación se muestra:

$$\theta = W \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

Se dice que el suelo contiene un grado de saturación (S) cuando los poros del mismo se encuentran parcialmente llenos, dicha saturación queda definida como la relación entre el volumen de agua (V_w) y el volumen de vacíos (V_v),

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w}{V_a + V_w} \times 100$$

obteniendo así los siguientes resultados:

S=1	Los poros se encuentran llenos de agua, se tiene condición de saturación y existen dos fases: suelo y agua.
0<S<1	Los poros están parcialmente saturados, hay agua y aire en ellos y existen tres fases: suelo, agua y aire.
S=0	Los poros solo contienen aire y existe un sistema con dos fases: suelo y aire.

Gradiente hidráulico

Si se consideran dos puntos A y B a lo largo de una corriente subterránea, presentándose en cada punto su carga hidráulica H_A y H_B respectivamente se dice que el gradiente hidráulico en la dirección A-B queda definido de la siguiente manera:

$$i = \frac{H_B - H_A}{L}$$

siendo L la distancia entre los puntos A y B. Es importante señalar que el gradiente se considera negativo si se toma en la dirección del flujo.

La carga hidráulica es la fuerza que impulsa al flujo del agua subterránea; cuando el fluido tiene la misma carga en cualquier punto no se presenta movimiento alguno, por el contrario cuando se presenta una diferencia de cargas hidráulicas, el agua fluye en dirección en que disminuye la carga considerando lo siguiente:

$$P_i = \rho g(h_i - Z_i)$$

de la formula anterior, al despejar la carga hidráulica resulta:

$$h_i = \frac{P_i}{\rho g} + Z_i$$

donde : P =Presión (M/L^2)
 ρ =densidad del agua (M/L^3)
 g =aceleración (L/T^2)
 h_i =carga hidráulica en el punto i , medida con un piezómetro.
 Z_i =carga de posición considerando un nivel de referencia (L).

Bernoulli presenta la ecuación a lo largo de una línea de corriente, resultando la siguiente ecuación:

$$\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \Delta h$$

siendo Δh la pérdida de energía entre los puntos 1 y 2:

$$\Delta h = h_1 - h_2$$

Ley de Darcy

Darcy encontró que la velocidad del flujo a través de un medio poroso es directamente proporcional a la pérdida de carga e inversamente proporcional a la longitud que recorre el flujo, a esta relación se le conoce como ley de Darcy.

$$Q = -KA \frac{dh}{dL}$$

$$V = \frac{Q}{A} = -K \frac{dh}{dL} = Ki$$

donde: K =coeficiente de permeabilidad o de conductividad hidráulica (L/T)
 i =gradiente hidráulico, $i=dh/dL$
 A =área del tubo de flujo (L^2)

Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad que tiene un medio poroso para transmitir un fluido; la conductividad hidráulica es la capacidad del mismo para transmitir agua. El coeficiente de conductividad hidráulica K se obtiene de la ecuación de Darcy resultando la siguiente expresión:

$$K = \frac{Q}{A \left(\frac{dh}{dL} \right)}$$

La permeabilidad puede determinarse en laboratorio o en campo mediante métodos experimentales.

5.2 Teoría para el diseño de la obra de recarga.

Las dimensiones y el número de balsas de infiltración dependen de la topografía, de las cargas hidráulicas y de la permeabilidad del terreno. Para la realización del diseño de las balsas de infiltración de este proyecto el valor de la permeabilidad fue supuesto, ya que no se logró obtener información precisa al respecto, más adelante se hace la justificación del valor elegido.

El proyecto de un sistema de infiltración rápida está caracterizado por dos valores, el de *la carga hidráulica anual* y el *caudal de aplicación diario*. Posteriormente, a partir de carga hidráulica se obtiene la superficie necesaria de infiltración, (Metcalf, 1985).

Carga hidráulica anual

La carga hidráulica anual de proyecto está en función de la permeabilidad o conductividad vertical efectiva de la columna de suelo situada por encima del agua subterránea. La carga hidráulica anual basada en la permeabilidad del terreno, se

obtiene multiplicando la velocidad de infiltración determinada in situ por un factor de aplicación que depende del sistema empleado para las mediciones en campo y del número de días al año en que funciona el sistema. Resultando así la siguiente expresión:

$$L_w = IR \times OD \times F \times C$$

donde: L_w = Carga hidráulica anual, (m/año)
 IR = velocidad de infiltración, (m/h)
 OD = número de días de funcionamiento al año, (d/año)
 F = factor de aplicación
 C = factor de conversión (24 h/d)

Dicho en otras palabras, la carga hidráulica anual representa la cantidad total de agua que se logra infiltrar a través del suelo durante un año tomando en cuenta las propiedades del mismo.

En la tabla 5.1 se muestran los factores de aplicación recomendados para el cálculo de la carga hidráulica anual para los sistemas de infiltración rápida, se proporcionan además, los valores del factor de aplicación recomendados para los diferentes métodos de ensayo y medición in situ del proyecto.

Medidas sobre el terreno	Factor de aplicación, (f)
Ensayo de infiltración en balsas	10-15 % de la velocidad de infiltración mínima media
Infiltrómetro cilíndrico y permeámetro con entrada de aire	2-4 % de la velocidad de infiltración mínima media
Conductividad hidráulica vertical	4-10 % de la conductividad del estrato más restrictivo

(Metcalf, 1985)

Tabla 5.1 Factores de aplicación

Caudal de aplicación diario.

El caudal de aplicación diario (R_a) se calcula a partir de la carga hidráulica anual (L_w) y del ciclo operativo, este parámetro representa el número de metros necesarios de agua para lograr la carga hidráulica deseada y se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$R_a = \left(\frac{L_w}{D} \right) \left(\frac{DCO}{PA} \right)$$

donde: R_a = tasa o caudal de aplicación diario, (m/d)
 L_w = carga hidráulica anual; (m/año)
 D = factor de conversión, (365 d/año)
 DCO = duración del ciclo operativo, (días)
 PA = periodo de aplicación, (días).

En los sistemas de infiltración rápida (balsas de infiltración), para permitir la reaireación del suelo entre períodos de aplicación y para procurar el tiempo necesario para la descomposición de la materia orgánica acumulada y el desarrollo de otras transformaciones biológicas como la nitrificación es necesario que existan períodos de secado. A la combinación de períodos de aplicación y de secado se le conoce con el nombre de ciclo operativo o ciclo de riego.

Los ciclos operativos se establecen para minimizar la infiltración, la eliminación de nitrógeno, o la nitrificación. En la tabla 5.2 se presentan los valores recomendados para alcanzar los objetivos señalados.

Superficie necesaria.

Se determina al dividir el gasto medio aportado por la planta de tratamiento entre la carga hidráulica anual de diseño, obteniendo la siguiente ecuación, (**Metcalf, 1985**):

$$A = \frac{Q \times E}{F \times L_w}$$

donde: A = superficie necesaria, (ha)
 L_w = carga hidráulica anual, (m/año)
 E = factor de conversión, (365 d/año)
 F = factor de conversión (10 000 m²/ha)

Debido a que en algunas ocasiones es necesario disponer de espacios adicionales para accesos, zonas de amortiguación, almacenamiento o regulación de caudales y futuras ampliaciones, la superficie necesaria para el proceso de infiltración excluye lo antes mencionado.

Objetivo del Ciclo de recarga	Agua residual aplicada	Estación	Período de aplicación	Período de secado
Maximización de las velocidades de infiltración	Primaria	Verano	1-2	5-7
		Invierno	1-2	7-12
	Secundaria	Verano	1-3	4-5
		Invierno	1-3	5-10
Maximización de la eliminación de nitrógeno	Primaria	Verano	1-2	10-14
		Invierno	1-2	12-16
	Secundaria	Verano	7-9	10-15
		Invierno	9-12	12-16
Maximización de la nitrificación	Primaria	Verano	1-2	5-7
		Invierno	1-2	7-12
	Secundaria	Verano	1-3	4-5
		Invierno	1-3	5-10

(Metcalf, 1985)

*Independientemente de la estación o del objetivo del ciclo, los periodos de aplicación de efluentes primarios se deben limitar a 1 ó 2 días con la finalidad de evitar una excesiva colmatación del suelo.

Tabla 5.2 Ciclos de carga más comunes en sistemas de infiltración rápida

Distribución espacial de la superficie de infiltración.

La distribución de las balsas de infiltración depende de la geometría y del ciclo operativo. La zona de infiltración se divide en diversas zonas de aplicación, de entre las cuales se encuentran las balsas que recibirán agua residual mientras las restantes permanecerán en la fase de secado. El número de balsas de infiltración debe ser el necesario para asegurar que siempre existan una o algunas balsas operando. En la tabla 5.3 se indica el número mínimo de balsas de infiltración para

los diferentes ciclos operativos y con aplicación continua de agua residual, (Metcalf, 1985).

Periodo de aplicación (días)	Duración del ciclo de descanso (días)	Número mínimo de balsas de infiltración
1	5-7	6-8
2	5-7	4-5
1	7-12	8-13
2	7-12	5-7
1	4-5	5-6
2	4-5	3-4
3	4-5	3
1	5-10	6-11
2	5-10	4-6
3	5-10	3-5
1	10-14	11-15
2	10-14	6-8
1	12-16	13-17
2	12-16	7-9
7	10-15	3-4
8	10-15	3
9	10-15	3
7	12-16	3-4
8	12-16	3
9	12-15	3

(Metcalf, 1985)

Tabla 5.3 Número mínimo de balsas de infiltración

5.3 Diseño de la obra de recarga.

Haciendo uso de las expresiones consideradas en el apartado 5.2, el diseño de las balsas de infiltración se realizó siguiendo cuidadosamente cada uno de los pasos que el apartado menciona, aunado a los criterios tomados que mejor se ajustan al caso en estudio.

Carga hidráulica.

Para determinar la carga hidráulica (L_w) se hicieron diferentes cálculos considerando permeabilidades para diferentes materiales, ya que este último no se logró conseguir en las fuentes correspondientes. Fue necesario proponer

primeramente el ciclo operativo de la obra de recarga, con el fin de obtener los días de operación al año (OD), así como conocer los periodos de aplicación y de secado, ya que estos datos son necesarios para realizar los demás cálculos. En la Tabla 5.4 se muestra el ciclo operativo propuesto.

Balsa	Opera	L	M	M	J	V	S	D
1	Si	1	1	1				
	No				0	0	0	0
2	Si	1	1	1				
	No				0	0	0	0
3	Si				1	1	1	0
	No	0	0	0				
4	Si				1	1	1	0
	No	0	0	0				

Tabla 5.4 Ciclo operativo propuesto

A partir de la tabla 5.2 se obtuvo gran parte del ciclo operativo, considerando un periodo de aplicación de 3 días con 4 días de descanso y con cuatro balsas de infiltración. Se considera el funcionamiento de las balsas en pares, es decir la 1 y la 2 operaran conjuntamente los días señalados (L, M y M), por otra parte la 3 y 4 operan los días que descansan las antes mencionadas, por lo tanto son 6 días de operación a la semana sumando un total de 312 días de funcionamiento al año.

El factor de aplicación (F) se obtuvo de la tabla 5.1; para ello, se considero el 10 por ciento que representa el ensayo de infiltración en balsas, es decir, las pruebas de infiltración del suelo se determinan en el lugar de la obra de recarga.

Caudal de aplicación diario.

Una vez determinada la carga hidráulica, se determinó el caudal de aplicación diario el cual representa el total de metros de agua que se ha de infiltrar diariamente; para ello, se consideró el ciclo operativo propuesto anteriormente del cual se obtuvo la duración del ciclo operativo y el periodo de aplicación,

resultando el primero de 7 días y el segundo de 6. Posteriormente con las cargas hidráulicas obtenidas se determinó el caudal de aplicación diario para cada una de ellas.

Superficie necesaria.

La superficie necesaria para infiltrar la cantidad de agua deseada involucra dos aspectos muy importantes, uno de ellos es el gasto aportado por la planta de tratamiento y el otro es la carga hidráulica estimada, es importante señalar que el valor que resulte al hacer el cálculo de la superficie necesaria estará restringido por el valor real de la superficie con que se cuenta. Para la obtención de la superficie necesaria, esta fue calculada considerando cuatro gastos siendo estos los que se muestran a continuación:

Q_1	$Q_T =$ Gasto total
Q_2	80% del Q_T
Q_3	75% del Q_T
Q_4	70% del Q_T

5.3.1 Memoria de calculo.

La memoria de calculo que se muestra en este capítulo representa la alternativa que mejor se adapta a las condiciones topográficas y técnicas del proyecto a realizar, considerando la alternativa para el gasto $Q_2=80\% Q_T$. La justificación de la alternativa seleccionada se presenta en los resultados del diseño, para los demás casos el procedimiento de cálculo es el mismo, solo varían los datos de diseño.

Carga hidráulica

$$L_w = IR \times OD \times F \times C$$

donde:

$$\begin{aligned} IR &= 0.2 \text{ m/h} \\ OD &= 312 \text{ d/año} \\ F &= 10\% \\ C &= 24 \text{ h/d} \end{aligned}$$

$$\therefore L_w = 149.76 \text{ m/año}$$

Caudal de aplicación diario

$$R_a = \left(\frac{L_w}{D} \right) \left(\frac{DCO}{PA} \right)$$

donde:

$$\begin{aligned} L_w &= 149.76 \text{ m/año} \\ D &= 365 \text{ d/año} \\ DCO &= 7 \text{ días} \\ PA &= 6 \text{ días} \end{aligned}$$

$$R_a = 0.48 \text{ m/d}$$

Superficie necesaria

$$A = \frac{Q \times E}{F \times L_w}$$

donde:

$$\begin{aligned} L_w &= 149.76 \text{ m/año} \\ E &= 365 \text{ d/año} \\ F &= 10\,000 \text{ m}^2/\text{ha} \end{aligned}$$

$$\therefore A = 2.36 \text{ ha}$$

Los resultados obtenidos para este caso así como para las demás alternativas se muestran en el apartado siguiente.

Resultados del diseño

En las tablas 5.5.1 a 5.5.4 se muestran los resultados de los cálculos utilizando los diferentes gastos considerados, diferentes velocidades de infiltración disminuyendo estas a partir de 1.8 hasta 0.1 m/h, el número de funcionamiento al año en días, duración del ciclo operativo así como periodos de secado. Obteniendo así la carga hidráulica, caudal de aplicación diario, superficie necesaria y por último el tirante necesario que deberán tener las balsas de infiltración.

Es posible observar el comportamiento que presentan los tres factores principales del diseño (carga hidráulica, caudal de aplicación diario y superficie necesaria).

El primero de ellos que es la carga hidráulica disminuye cuando la velocidad de infiltración (IR) y el número de días de funcionamiento al año (OD) disminuyen gradualmente, esto se observa claramente en las tablas de resultados obtenidos.

El caudal de aplicación diario presenta un comportamiento similar al de la carga hidráulica, esto es debido a que el caudal de aplicación involucra a la carga hidráulica y a medida que esta disminuye la tasa de aplicación también lo hace.

La superficie necesaria disminuye a razón de que el gasto también disminuye, esto refleja lo siguiente, si se quiere infiltrar una gran cantidad de agua se necesitará más superficie disponible. Debido a lo anterior es necesario conocer las dimensiones del terreno que albergará la obra de recarga con el fin de no superar la superficie disponible.

Para el diseño de este proyecto se decidió seleccionar el gasto $Q_2 = 80\% Q_T$, con la finalidad de garantizar un abastecimiento constante de agua residual a las balsas de infiltración y así evitar variaciones del mismo que puedan afectar el

Tabla 5.5.1 Diseño de balsas de infiltracion considerando $Q_1=Q_T$

Q		IR			OD	F	Co	Pa	Lw	Ra	A		T
(m ³ /d)	(l/s)	cm/s	cm/h	(m/h)	(d/año)	%	(dias)	(dias)	(m/año)	(m/d)	(ha)	(m ²)	(m)
12096	140	0.0500	180	1.8	312	10	7	6	1347.84	4.31	0.33	3275.64	4.31
12096	140	0.0341	122.6	1.226	312	10	7	6	918.03	2.93	0.48	4809.26	2.93
12096	140	0.0295	106.2	1.062	312	10	7	6	795.23	2.54	0.56	5551.93	2.54
12096	140	0.0278	100	1	312	10	7	6	748.80	2.39	0.59	5896.15	2.39
12096	140	0.0170	61.3	0.613	312	10	7	6	459.01	1.47	0.96	9618.52	1.47
12096	140	0.0139	50	0.5	312	10	7	6	374.40	1.20	1.18	11792.31	1.20
12096	140	0.0111	40	0.4	312	10	7	6	299.52	0.96	1.47	14740.38	0.96
12096	140	0.0090	32.4	0.324	312	10	7	6	242.61	0.78	1.82	18198.01	0.78
12096	140	0.0083	30	0.3	312	10	7	6	224.64	0.72	1.97	19653.85	0.72
12096	140	0.0061	22	0.22	312	10	7	6	164.74	0.53	2.68	26800.70	0.53
12096	140	0.0056	20	0.2	312	10	7	6	149.76	0.48	2.95	29480.77	0.48
12096	140	0.0042	15	0.15	312	10	7	6	112.32	0.36	3.93	39307.69	0.36
12096	140	0.0028	10	0.1	312	10	7	6	74.88	0.24	5.90	58961.54	0.24

Tabla 5.5.2 Diseño de balsas de infiltracion considerando $Q_2=80\% Q_T$

Q		IR			OD	F	Co	Pa	Lw	Ra	A		T
(m ³ /d)	(l/s)	cm/s	cm/h	(m/h)	(d/año)	%	(dias)	(dias)	(m/año)	(m/d)	(ha)	(m ²)	(m)
9676.8	112	0.0500	180	1.8	312	10	7	6	1347.84	4.31	0.26	2620.51	4.31
9676.8	112	0.0341	122.6	1.226	312	10	7	6	918.03	2.93	0.38	3847.41	2.93
9676.8	112	0.0295	106.2	1.062	312	10	7	6	795.23	2.54	0.44	4441.55	2.54
9676.8	112	0.0278	100	1	312	10	7	6	748.80	2.39	0.47	4716.92	2.39
9676.8	112	0.0170	61.3	0.613	312	10	7	6	459.01	1.47	0.77	7694.82	1.47
9676.8	112	0.0090	32.4	0.324	312	10	7	6	242.61	0.78	1.46	14558.40	0.78
9676.8	112	0.0139	50	0.5	312	10	7	6	374.40	1.20	0.94	9433.85	1.20
9676.8	112	0.0111	40	0.4	312	10	7	6	299.52	0.96	1.18	11792.31	0.96
9676.8	112	0.0083	30	0.3	312	10	7	6	224.64	0.72	1.57	15723.08	0.72
9676.8	112	0.0061	22	0.22	312	10	7	6	164.74	0.53	2.14	21440.56	0.53
9676.8	112	0.0056	20	0.2	312	10	7	6	149.76	0.48	2.36	23584.62	0.48
9676.8	112	0.0042	15	0.15	312	10	7	6	112.32	0.36	3.14	31446.15	0.36
9676.8	112	0.0028	10	0.1	312	10	7	6	74.88	0.24	4.72	47169.23	0.24

Tabla 5.5.3 Diseño de balsas de infiltración considerando $Q_3=75\% Q_T$

Q		IR			OD	F	Co	Pa	Lw	Ra	A		T
(m ³ /d)	(l/s)	cm/s	cm/h	(m/h)	(d/año)	%	(días)	(días)	(m/año)	(m/d)	(ha)	(m ²)	(m)
9072	105	0.0500	180	1.8	312	10	7	6	1347.84	4.31	0.25	2456.73	4.31
9072	105	0.0341	122.6	1.226	312	10	7	6	918.03	2.93	0.36	3606.95	2.93
9072	105	0.0295	106.2	1.062	312	10	7	6	795.23	2.54	0.42	4163.95	2.54
9072	105	0.0278	100	1	312	10	7	6	748.80	2.39	0.44	4422.12	2.39
9072	105	0.0170	61.3	0.613	312	10	7	6	459.01	1.47	0.72	7213.89	1.47
9072	105	0.0090	32.4	0.324	312	10	7	6	242.61	0.78	1.36	13648.50	0.78
9072	105	0.0139	50	0.5	312	10	7	6	374.40	1.20	0.88	8844.23	1.20
9072	105	0.0111	40	0.4	312	10	7	6	299.52	0.96	1.11	11055.29	0.96
9072	105	0.0083	30	0.3	312	10	7	6	224.64	0.72	1.47	14740.38	0.72
9072	105	0.0061	22	0.22	312	10	7	6	164.74	0.53	2.01	20100.52	0.53
9072	105	0.0056	20	0.2	312	10	7	6	149.76	0.48	2.21	22110.58	0.48
9072	105	0.0042	15	0.15	312	10	7	6	112.32	0.36	2.95	29480.77	0.36
9072	105	0.0028	10	0.1	312	10	7	6	74.88	0.24	4.42	44221.15	0.24

Tabla 5.5.4 Diseño de balsas de infiltración considerando $Q_4=70\% Q_T$

Q		IR			OD	F	Co	Pa	Lw	Ra	A		T
(m ³ /d)	(l/s)	cm/s	cm/h	(m/h)	(d/año)	%	(días)	(días)	(m/año)	(m/d)	(ha)	(m ²)	(m)
8467.2	98	0.0500	180	1.8	312	10	7	6	1347.84	4.31	0.23	2292.95	4.31
8467.2	98	0.0341	122.6	1.226	312	10	7	6	918.03	2.93	0.34	3366.48	2.93
8467.2	98	0.0295	106.2	1.062	312	10	7	6	795.23	2.54	0.39	3886.35	2.54
8467.2	98	0.0278	100	1	312	10	7	6	748.80	2.39	0.41	4127.31	2.39
8467.2	98	0.0170	61.3	0.613	312	10	7	6	459.01	1.47	0.67	6732.97	1.47
8467.2	98	0.0090	32.4	0.324	312	10	7	6	242.61	0.78	1.27	12738.60	0.78
8467.2	98	0.0139	50	0.5	312	10	7	6	374.40	1.20	0.83	8254.62	1.20
8467.2	98	0.0111	40	0.4	312	10	7	6	299.52	0.96	1.03	10318.27	0.96
8467.2	98	0.0083	30	0.3	312	10	7	6	224.64	0.72	1.38	13757.69	0.72
8467.2	98	0.0061	22	0.22	312	10	7	6	164.74	0.53	1.88	18760.49	0.53
8467.2	98	0.0056	20	0.2	312	10	7	6	149.76	0.48	2.06	20636.54	0.48
8467.2	98	0.0042	15	0.15	312	10	7	6	112.32	0.36	2.75	27515.38	0.36
8467.2	98	0.0028	10	0.1	312	10	7	6	74.88	0.24	4.13	41273.08	0.24

correcto funcionamiento de la obra. Otro motivo para seleccionar esta alternativa fue que una vez obtenidos los cálculos siguiendo las condiciones de diseño que se plantearon se logró obtener una superficie necesaria muy cercana a la disponible para el proyecto.

Los motivos de no considerar las otras tres alternativas se exponen a continuación:

ALTERNATIVA	MOTIVO
$Q_1 = Q_T$	No se garantiza un gasto constante para dotar de agua a las balsas de infiltración, ya que pueden presentarse variaciones en el caudal que afecten la operación de la obra de recarga.
$Q_3 = 75\%$ del Q_T	Aunque a simple vista se observa que bajo esas condiciones se esperaría un buen funcionamiento de la obra de recarga, se descartó debido a que el gasto a infiltrar es menor que el del gasto Q_3 .
$Q_4 = 70\%$ del Q_T	El caudal de infiltración está por debajo del gasto mínimo a infiltrar que debe ser de 100 l/s tal como se mencionó en el apartado 4.1.1.

Por lo tanto para elaborar el diseño de la obra de recarga se obtuvieron los valores de la superficie necesaria que resultaron para los diferentes gastos tomando como base los siguientes parámetros:

IR = 20 cm/h	OD = 312 d/año
F = 10 %	Co = 7 días
Pa = 7 días	L _w = 149.76 m/año
Ra = 0.48 m/d	

En la tabla 5.6 se comparan los resultados de diseño obtenidos con los parámetros antes mencionados.

Una vez elegida la alternativa propuesta en la tabla 5.5.2 se observa que el área necesaria total de infiltración es de 2.36 ha; como se consideraron 4 balsas de

Tabla 5.6 Resultados del diseño
IR = 20 cm/año

Q	A _{NEC}		No. Balsas	A _{C/B}	L	B	Y _{te}	Y _{op}	BL	H
	(l/s)	(Ha)								
140	2.95	29500	4	7375	86.8	85	0.48	0.5	0.2	0.7
112	2.36	23600	4	5900	76.8	76.8	0.48	0.5	0.2	0.7
105	2.21	22100	4	5525	75	73.7	0.48	0.5	0.2	0.7
98	2.06	20600	4	5150	71.7	71.7	0.48	0.5	0.2	0.7

Q	Gasto
A _{NEC}	Área necesaria
A _{C/B}	Área de cada balsa
L	Longitud
B	Ancho
Y _{op}	Tirante de operación
Y _{te}	Tirante teórico
BL	Bordo libre
H	Profundidad

infiltración, el área para cada una de ellas es de 5900 m² con 76.8 m de largo por 76.8 de ancho. El tirante teórico resulta ser el caudal de aplicación diario, ya que se necesitan 0.48 m de agua diarios por cada balsa. Se consideró además un bordo libre de 20 cm sumando así una profundidad total para cada balsa de infiltración de 0.7 m. Es importante señalar que de acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto que maneja cada balsa de infiltración es de 32.67 l/s.

En el anexo IV se muestra el arreglo que tendrán las balsas de infiltración dentro de la superficie contemplada.

5.4 Fases de la recarga artificial.

Es importante conocer el comportamiento del acuífero durante la infiltración, dado que la recarga artificial comprende un proceso de formación de una elevación de agua, un régimen estable y un proceso de desaparición de la elevación del agua cuando cesa la infiltración. A continuación se describen las cuatro fases que se presentan durante la recarga, **(Custodio, 1976)**.

Fase 1. Crecimiento de la cresta de agua.

El agua que es introducida se almacena y forma una cresta de agua, la cual aumenta gradualmente hasta alcanzar algún control de potencial, es decir, un límite que impide la expansión, ya sea cuando se reduce la recarga o iniciando un proceso de drenaje. La cresta aumenta hasta que alcanza la base de la obra de recarga (zanja o balsa) fase 2a, en cuyo momento el crecimiento de la cresta termina pero no el crecimiento en extensión, el cual continúa hasta alcanzar un lugar donde drenar el exceso de agua (río, dren, etc.) en ese momento cesa la extensión horizontal. En la fase 2b la cresta alcanza el control lateral sin haber alcanzado el control vertical.

Fase 2. Evolución hacia el régimen estable después de haber alcanzado el control lateral.

El volumen del agua almacenada decrece hasta alcanzar el régimen estacionario, el cual se alcanza teóricamente después de un tiempo infinito, pero a efectos rápidos se alcanza con rapidez.

Fase 3. Régimen estacionario.

El volumen de agua no varía, es decir, entra tanta agua como se descarga.

Fase 4. Desaparición de la cresta al cesar la recarga.

La cresta de agua drena hacia los controles laterales hasta desaparecer. Existe la posibilidad de que esta fase de inicio antes de haber llegado a la fase 3. Sin el control lateral no se puede alcanzar el régimen estacionario, es común que en la práctica se presente un control lateral aunque este se presente en forma de fuga de agua. El agua que se descarga en el control lateral crece durante la fase 2 y alcanza un nivel máximo durante la fase 3 y vuelve a decrecer durante la fase 4.

El control vertical se alcanza cuando el nivel freático alcanza el fondo del dispositivo de recarga con lo que el caudal aportado por unidad de superficie decrece. Este efecto no debe confundirse con la colmatación, ya que es considerado como un efecto hidráulico el cual produce una disminución del gradiente hidráulico, de tal forma que cuando el nivel de agua en el acuífero es igual al nivel de agua en el sistema de recarga cesa la entrada de agua. En la figura 5.1 se aprecia cada una de las fases anteriormente mencionadas

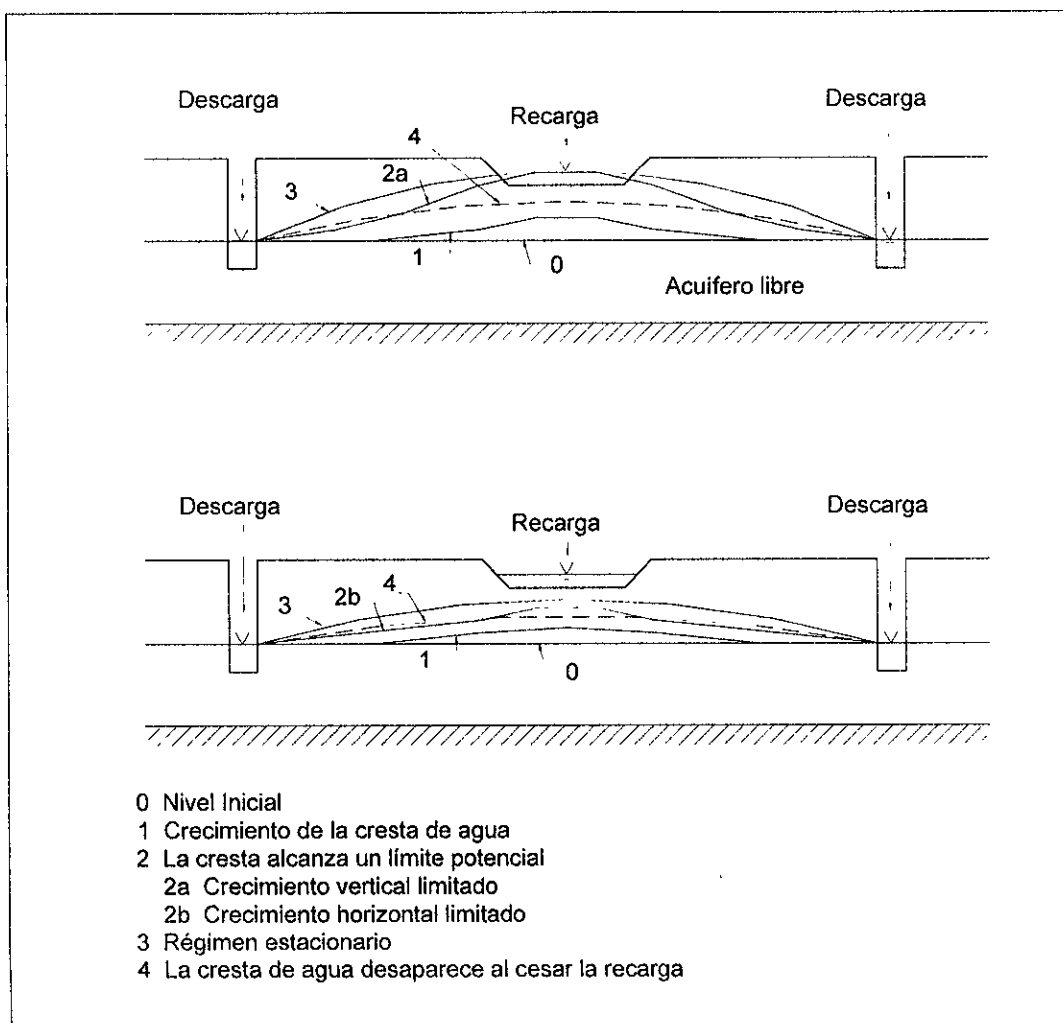


Figura 5.1 Fases de la recarga artificial

En la figura 5.2 se observa la evolución de la cresta de recarga bajo una balsa y la evolución temporal del caudal de recarga por unidad de superficie por efecto hidráulico siempre y cuando no exista colmatación.

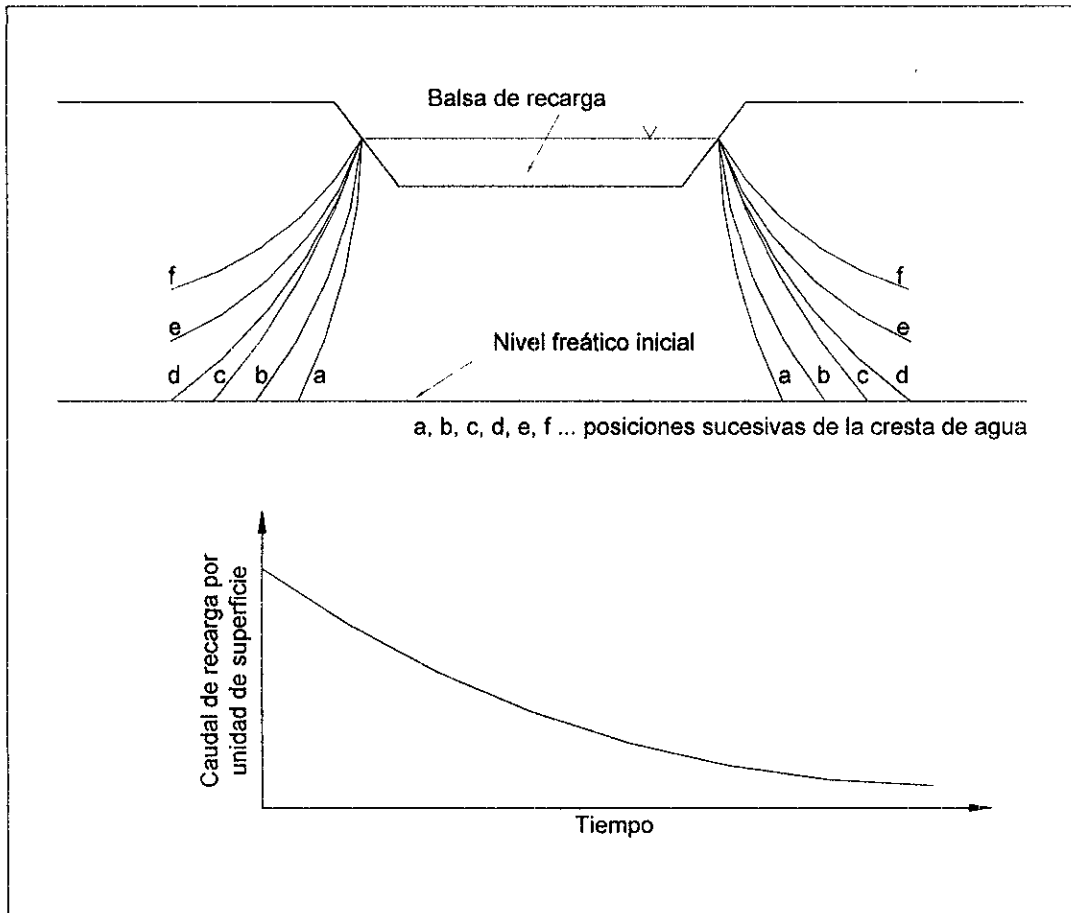


Figura 5.2 Evolución de la cresta de agua bajo una balsa de infiltración.

5.5 Construcción y mantenimiento de las balsas de infiltración.

Son muchos los aspectos que intervienen durante el proceso de planeación construcción y mantenimiento de los sistemas de recarga artificial, uno de ellos es el económico, ya que si no se hace un correcto estudio de este ultimo factor, pueden sucitarse problemas que afecten al funcionamiento de la obra y más aun el no cumplimiento de los objetivos propuestos.

Los factores económicos que deben ser considerados durante el proceso de planeación y construcción quedan catalogados de la siguiene forma:

Estudios previos.

- 1.- Estudios de campo
- 2.- Tramites sobre la adquisición del predio
 - a) Honorarios de abogados
 - b) Gastos notariales.
- 3.- Remodelación de la zona
- 4.- Estudios de Ingeniería
 - a) Levantamientos topográficos
 - b) Estudios geotécnicos
 - c) Estudios geológicos
- 5.- Diseño del proyecto en general
 - a) Balsas de infiltración
 - b) Obras complementarias
- 6.- Administración del proyecto
 - a) Inspección
 - b) Pruebas diversas

Aspectos constructivos.

Los conceptos que deben ser analizados durante el proceso de construcción y operación se muestran a continuación:

- 1.- Remodelación de la zona propuesta
 - a) Limpieza
 - b) Nivelación de acuerdo a especificaciones

2.- Construcción de balsas de infiltración

- a) Excavación
- b) Nivelación de cada balsa de infiltración
- c) Acondicionamiento de sistemas de interconexión

3.- Instalación de equipos aforadores

4.- Obras de control

- a) Compuertas
- b) Vertedores

5.- Instalaciones de acceso

- a) Andenes
- b) Caminos

6.- Mantenimiento

- a) Reparación y sustitución de estructuras
- b) Conservación del equipo
- c) Escarificación de material colmatado
- d) Mantenimiento de taludes
- e) Limpieza de balsas de infiltración

6.- Edificios

- a) Oficinas de administración y vigilancia
- b) Laboratorios para el análisis de muestras. (no indispensable)

La existencia de balsas de recarga en una zona puede crear problemas en la población que vive cerca de la obra de recarga, debido a lo anterior, es conveniente instalar vallas protectoras para evitar accidentes e impiden que esas excavaciones sean usadas como depósitos de basura.

En la figura 5.3 (Anexo IV) se muestra el arreglo en planta de las estructuras que comprenden el proyecto en estudio, entre las cuales se observan las balsas de infiltración, la forma en que se conectan, así como las estructuras hidráulicas adicionales.

La figura 5.4 (Anexo IV) muestra el perfil hidráulico del abastecimiento de agua tratada para las balsas de infiltración, también se observa la forma en que se conecta una balsa con la otra por medio de tubería subterránea. Debido a que se cuenta con carga hidráulica necesaria para dotar de agua a las balsas de infiltración, no es necesario instalar equipos de bombeo especiales para tal efecto. Los drenes se instalan con la finalidad de evitar derrames ocasionados por las precipitaciones que se puedan presentar en la zona del proyecto, ocasionando daños en las estructuras del sistema de recarga.

Mantenimiento.

El principal trabajo de mantenimiento consiste en desecar y limpiar aquellas partículas que se van depositando en el fondo de las balsas de infiltración. La limpieza puede realizarse con maquinaria de tal forma que se puedan retirar las partículas depositadas en la superficie sin provocar su penetración en el terreno permeable del acuífero, lo que ocasionaría una colmatación irreversible. Para evitar una excesiva compactación del terreno, es recomendable realizar el mantenimiento de cada balsa manualmente.

Una forma de luchar contra la colmatación es producir previamente sedimentación al influente que se pretende recargar. La retención y decantación puede realizarse en una balsa separada o bien en la propia balsa. Para el caso en estudio, la sedimentación queda considerada dentro de los procesos unitarios de la planta de tratamiento.

Con el fin de mantener una continuidad en la recarga, se puede disponer de un doble sistema de balsas tal como se enuncio en el apartado 5.3, las balsas pueden aislarse convenientemente unas a otras a fin de proceder al mantenimiento sin dejar fuera de funcionamiento a las otras.

El mantenimiento también contempla la desaparición de los mosquitos en la zona del proyecto, fenómeno que puede ser controlado mediante aditivos químicos, previendo que no se contaminen los cuerpos de agua, este problema también puede ser resuelto con el secado periódico de las instalaciones de recarga.

Cuando las partículas en suspensión que transporta el agua han penetrado en el terreno el remedio es mas difícil o imposible. Algunas veces se procede a retirar una parte del material del fondo reemplazándolo frecuentemente con una capa artificial de arena o grava apropiada, la sustitución total de las balsas de infiltración puede considerarse como una solución viable, siempre y cuando exista terreno y recursos disponibles, **(Custodio, 1976)**.

6

Conclusiones y recomendaciones

La construcción y puesta en marcha de este proyecto contribuirá con la recarga del acuífero Atoyac-Zahuapan, mismo que recibirá el caudal aportado por las balsas de infiltración y así atenuar los efectos de sobreexplotación que en el se presentan.

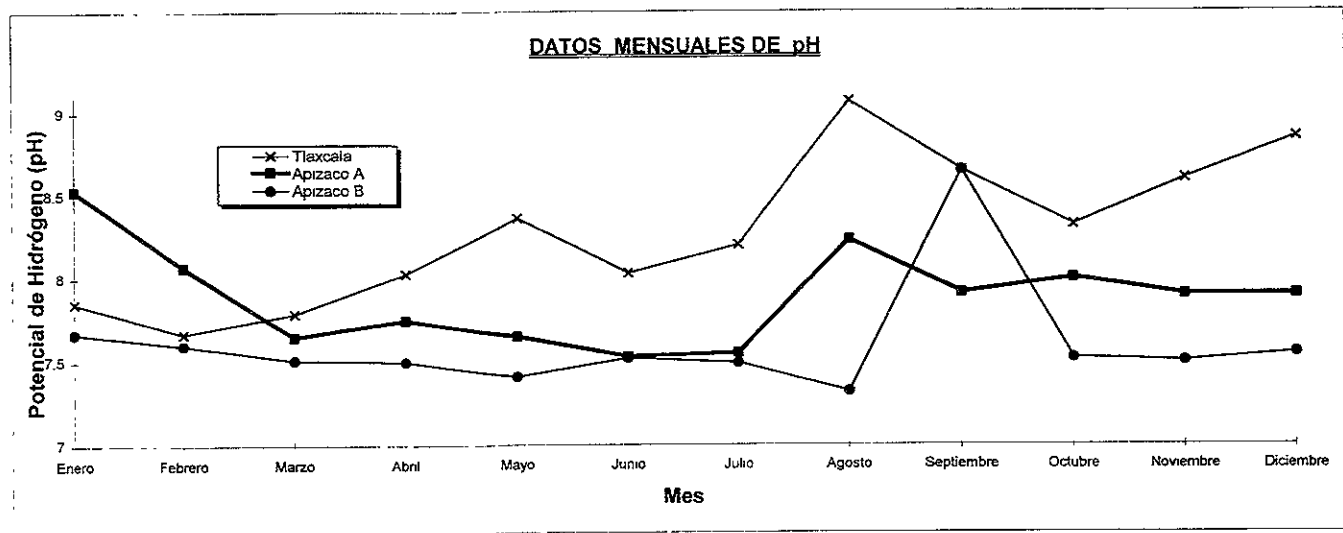
El método de recarga artificial elegido para la realización de este trabajo resultó ser de balsas de infiltración, el cual se adapta perfectamente a las características físicas y topográficas de la zona en estudio.

Una vez proyectado el sistema de recarga artificial, este requiere de estudios más amplios y de un monitoreo estricto con la finalidad de que el proyecto opere satisfactoriamente sin dañar los recursos naturales existentes.

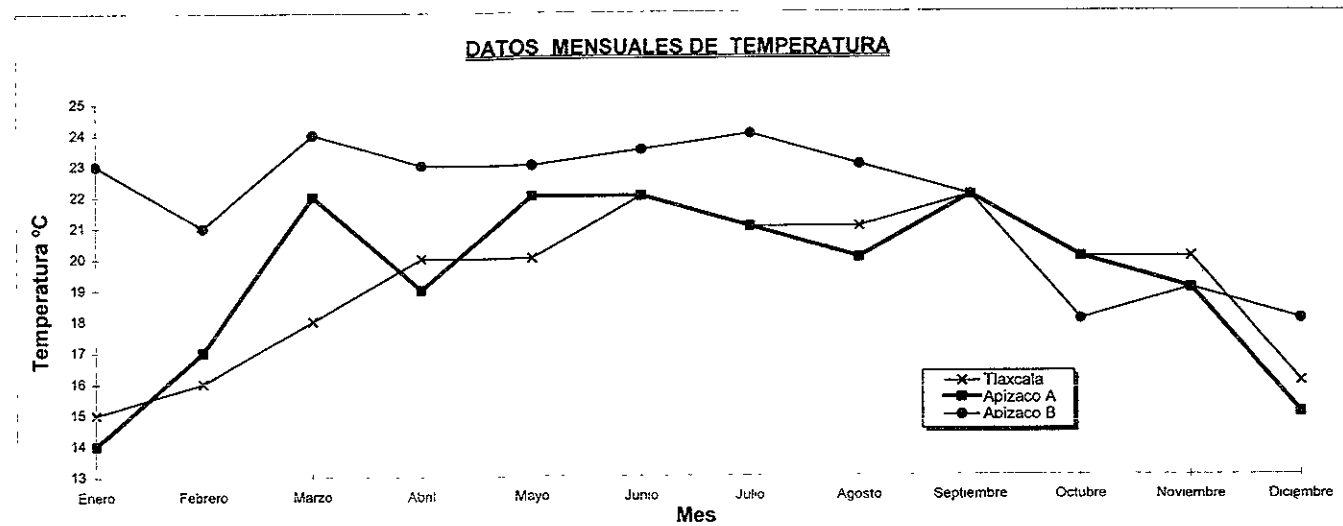
De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible infiltrar anualmente una cantidad considerable de agua residual, es por ello que debe garantizarse la calidad del agua aportada por la planta de tratamiento para no acelerar el fenómeno de colmatación en las balsas de infiltración, y sobre todo, que no se presente una contaminación en el agua subterránea.

Es conveniente realizar un levantamiento topográfico con más detalle para obtener las dimensiones correctas del predio, así como para obtener las pendientes del mismo, por otra parte es necesario realizar un estudio para determinar la permeabilidad real del suelo donde se desea instalar la obra de recarga.

Anexo I



Mes/Planta	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
TLAXCALA	7.85	7.67	7.79	8.03	8.36	8.03	8.2	9.07	8.65	8.32	8.6	8.85
APIZACO A	8.53	8.07	7.65	7.75	7.65	7.53	7.55	8.23	7.91	8	7.9	7.9
APIZACO B	7.67	7.6	7.51	7.5	7.41	7.52	7.49	7.32	8.65	7.52	7.5	7.55

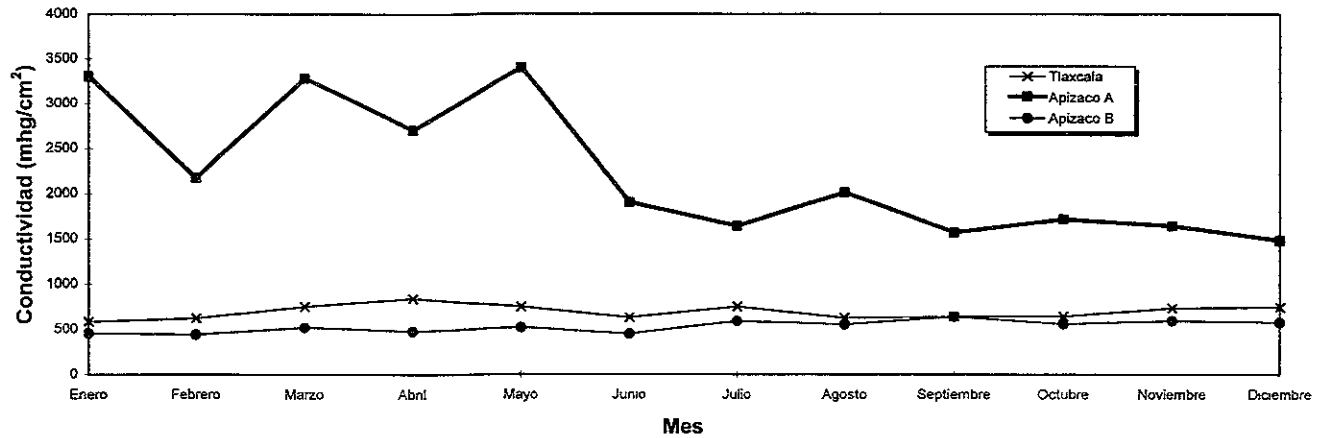


Mes/Planta	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
TLAXCALA	15	16	18	20	20	22	21	21	22	20	20	16
APIZACO A	14	17	22	19	22	22	21	20	22	20	19	15
APIZACO B	23	21	24	23	23	23.5	24	23	22	18	19	18

(C.G.E.E.T, 1996).

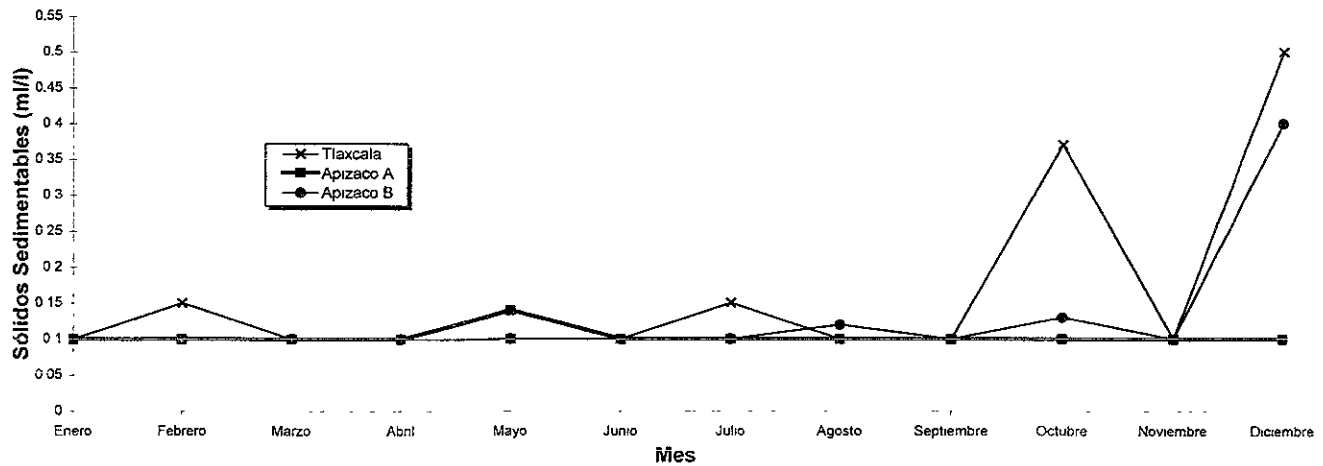
Gráfica a)

DATOS MENSUALES DE CONDUCTIVIDAD



Mes/Planta	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
TLAXCALA	584	623	751	840	749	632	753	626	641	645	734	746
APIZACO A	3304	2172	3285	2705	3400	1899	1643	2013	1570	1716	1643	1482
APIZACO B	456	443	521	477	521	452	591	555	641	559	595	579

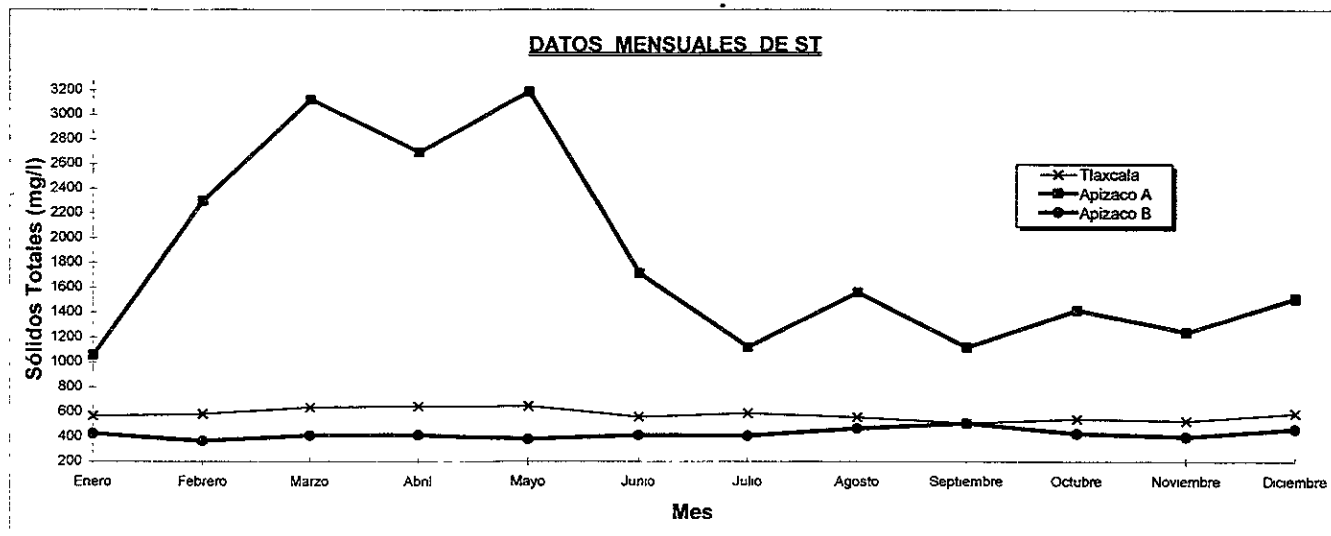
DATOS MENSUALES DE SS



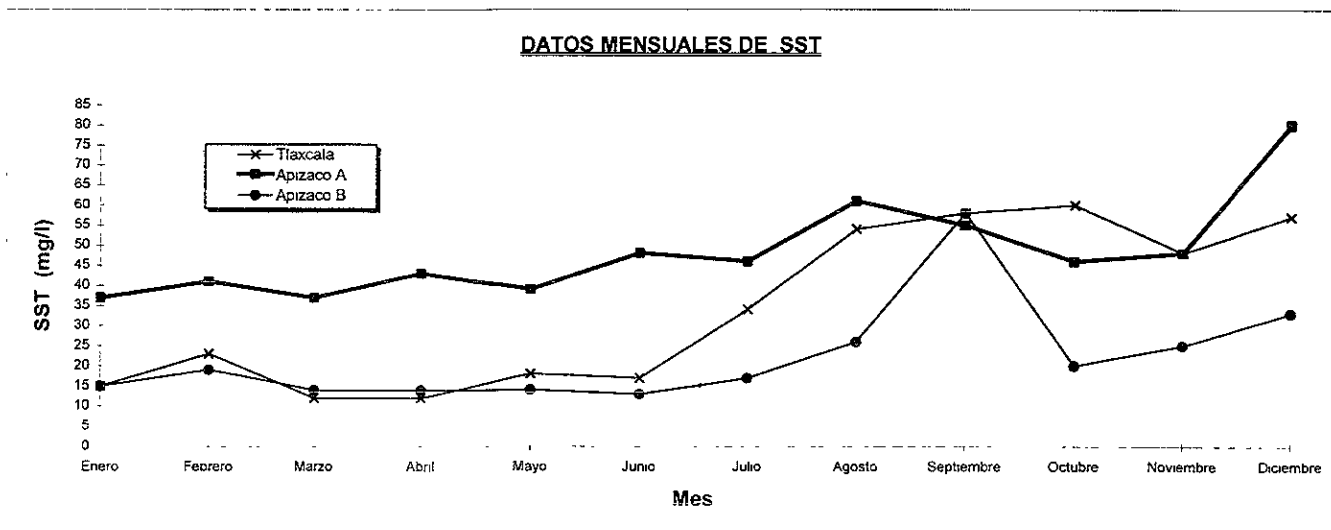
Mes/Planta	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
TLAXCALA	0.1	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.15	0.1	0.1	0.37	0.1	0.5
APIZACO A	0.1	0.1	0.1	0.1	0.14	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
APIZACO B	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.12	0.1	0.13	0.1	0.4

(C.G.E.E.T, 1996).

Gráfica b)



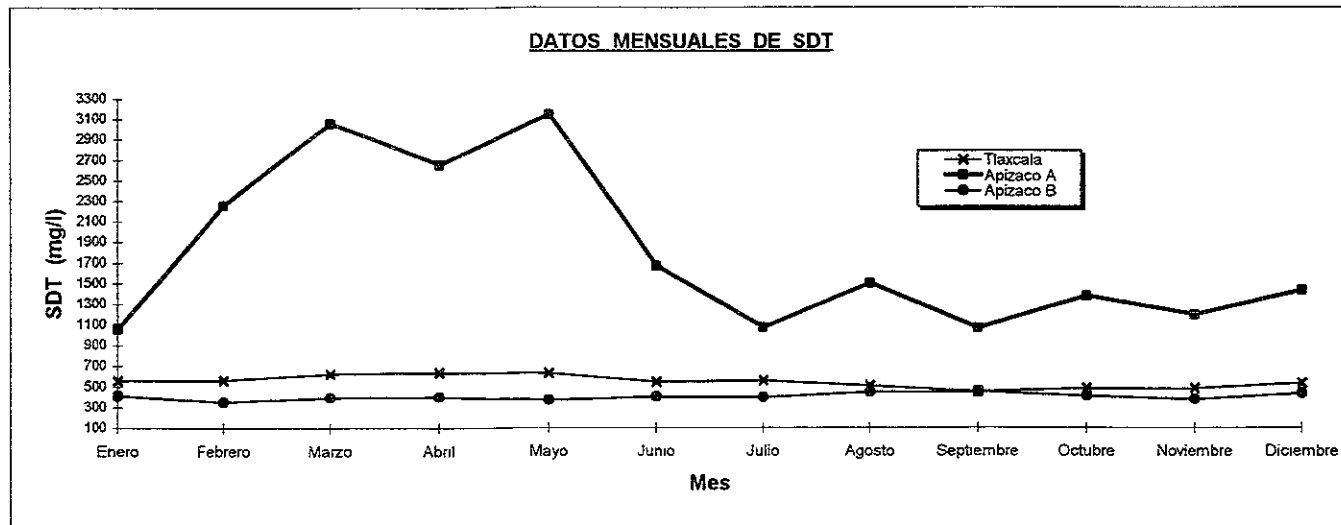
Mes/Planta	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
TLAXCALA	567	582	634	644	644	559	588	555	508	540	524	588
APIZACO A	1055	2299	3122	2695	3186	1716	1118	1559	1120	1419	1240	1512
APIZACO B	424	365	409	413	380	411	406	465	508	425	400	460



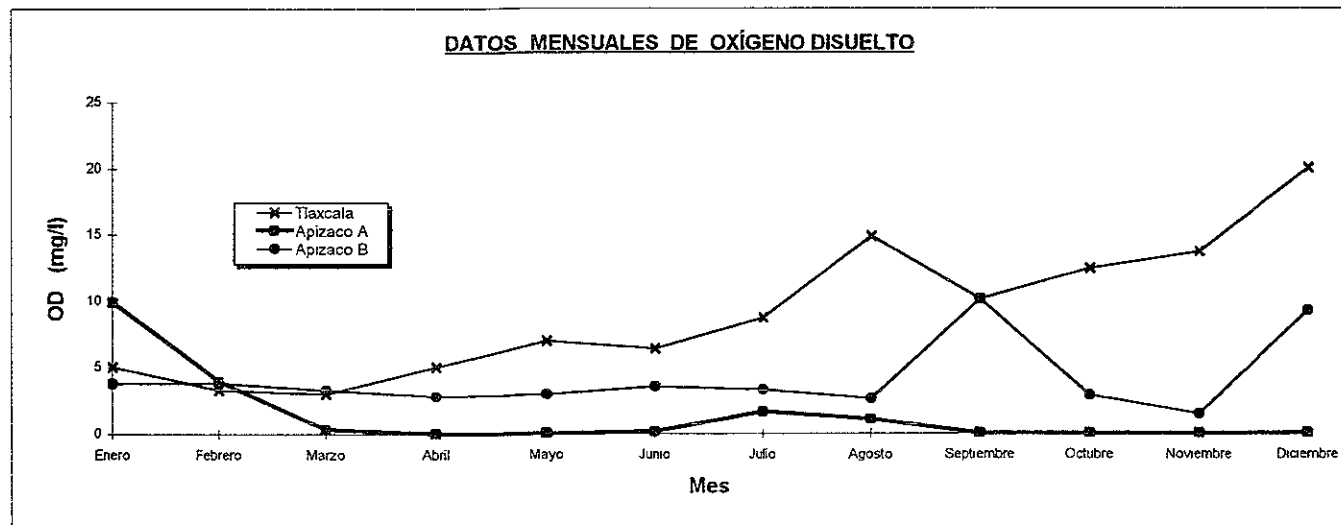
Mes/Planta	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
TLAXCALA	15	23	12	12	18	17	34	54	58	60	48	57
APIZACO A	37	41	37	43	39	48	46	61	55	46	48	80
APIZACO B	15	19	14	14	14	13	17	26	58	20	25	33

(C.G.E.E.T, 1996).

Gráfica c)



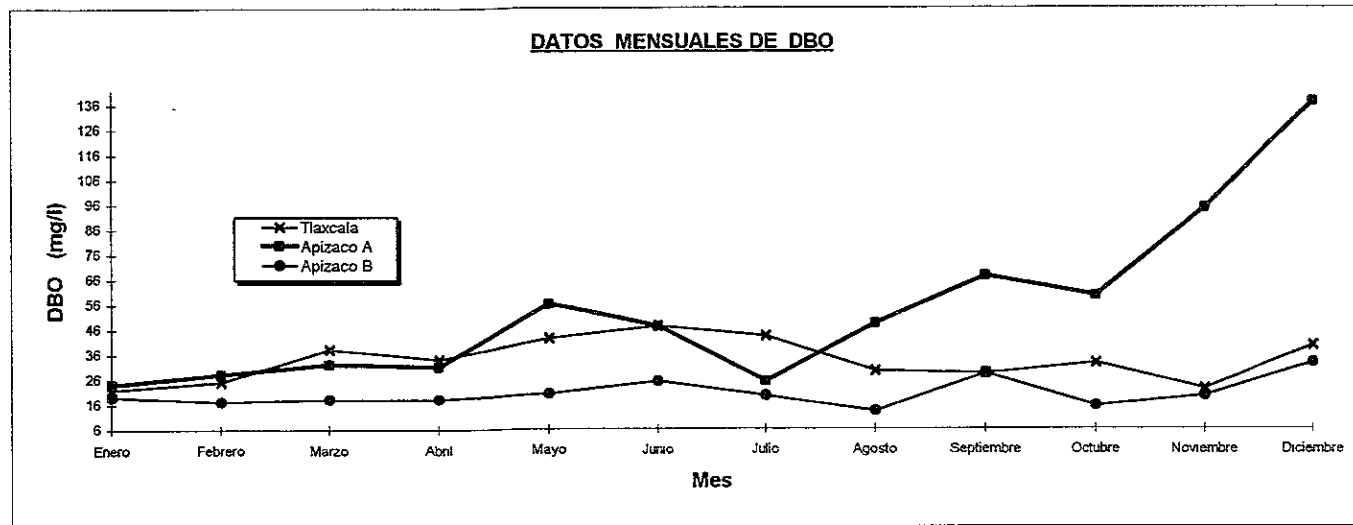
Mes/Planta	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
TLAXCALA	552	559	622	632	626	542	554	501	450	480	476	531
APIZACO A	1058	2258	3058	2652	3147	1668	1072	1498	1065	1373	1192	1432
APIZACO B	409	346	395	399	366	398	389	439	450	405	375	427



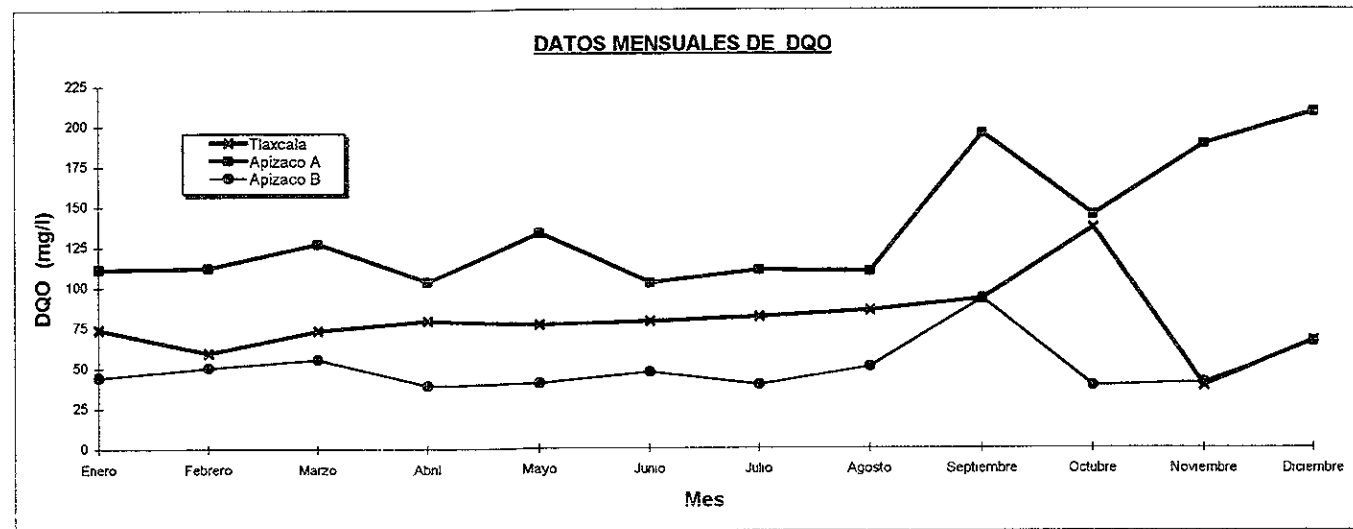
Mes/Planta	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
TLAXCALA	5.02	3.29	3.01	5.02	6.95	6.39	8.69	14.84	10.1	12.4	13.64	20
APIZACO A	9.9	3.96	0.34	0	0	0.16	1.63	1.05	0	0	0	0
APIZACO B	3.78	3.82	3.29	2.82	2.95	3.53	3.27	2.63	10.1	2.83	1.43	9.21

(C.G.E.E.T, 1996).

Gráfica d)



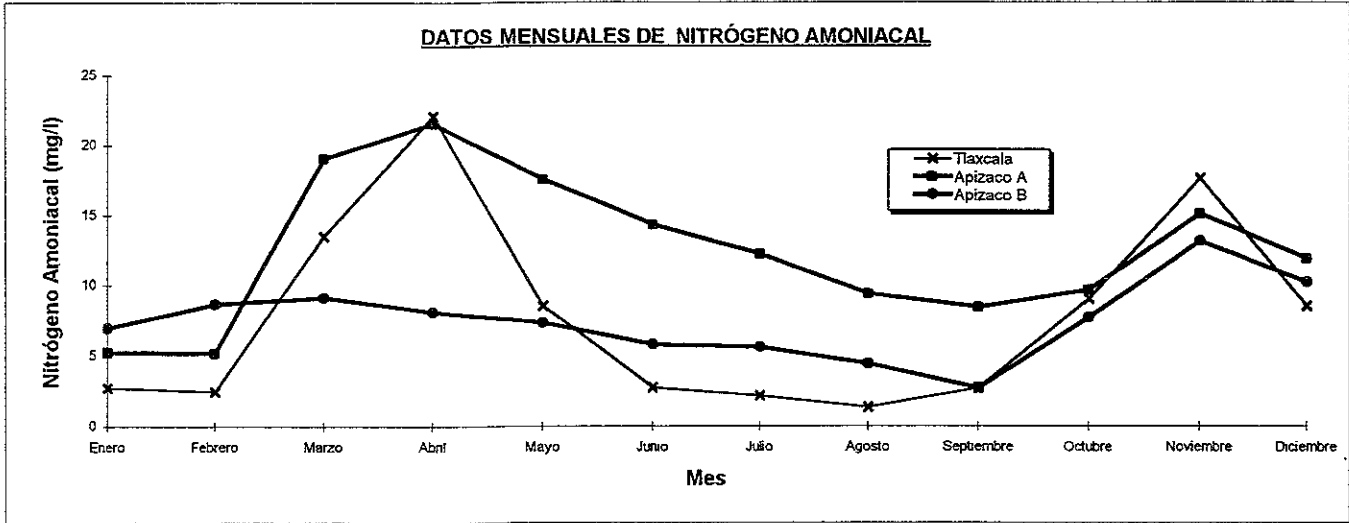
Mes/Planta	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
TLAXCALA	22	25	38	34	42	47	43	29	28	32	22	39
APIZACO A	24	28	32	31	56	47	25	48	67	59	94	137
APIZACO B	19	17	18	18	20	25	19	13	28	15	19	32



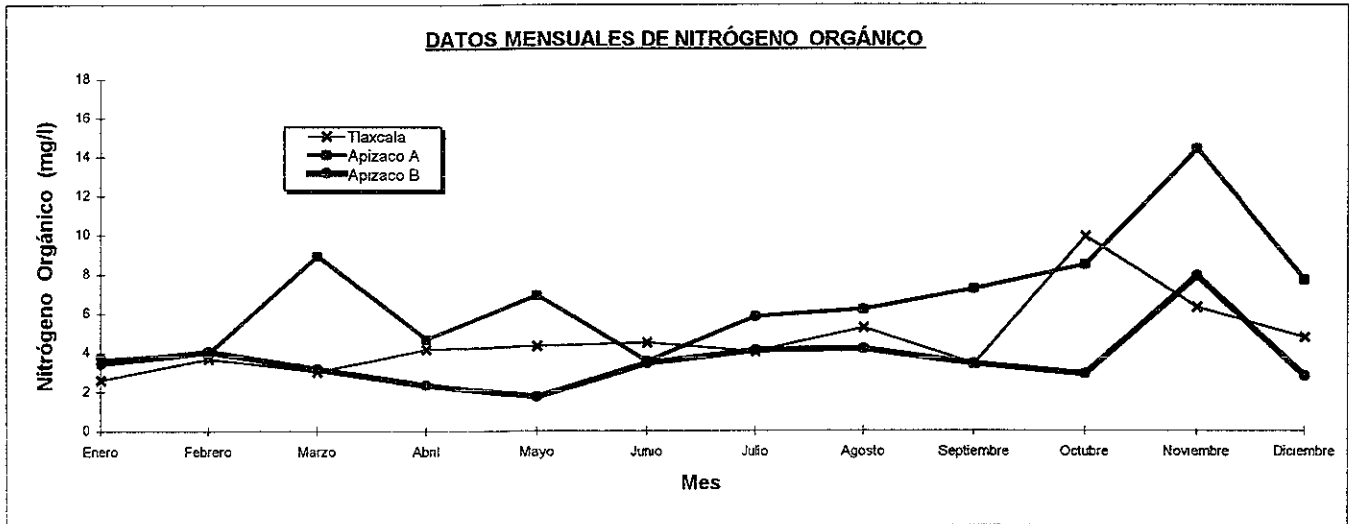
Mes/Planta	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
TLAXCALA	74	59	73	79	76	78	81	85	92	136	38	66
APIZACO A	111	112	127	103	133	102	110	109	195	144	188	208
APIZACO B	44	50	55	39	40	47	39	50	92	38	40	65

(C.G.E.E.T, 1996).

Gráfica e)



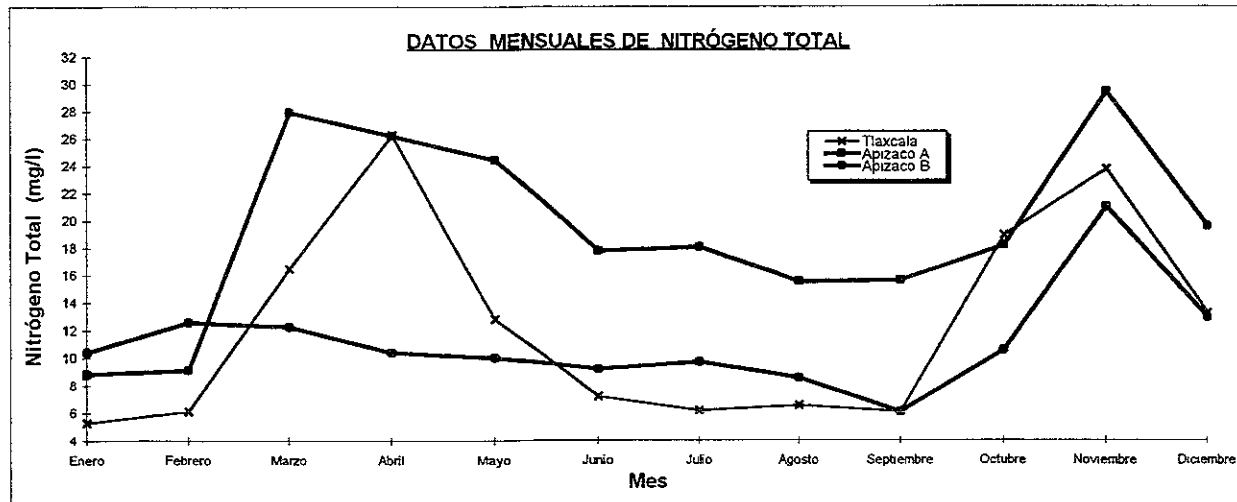
Mes/Planta	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
TLAXCALA	2.72	2.47	13.47	22.1	8.5	2.74	2.14	1.34	2.7	9	17.59	8.52
APIZACO A	5.22	5.19	19.03	21.55	17.53	14.28	12.2	9.37	8.44	9.67	15.07	11.89
APIZACO B	6.97	8.63	9.12	8.11	7.33	5.79	5.62	4.42	2.7	7.69	13.13	10.18



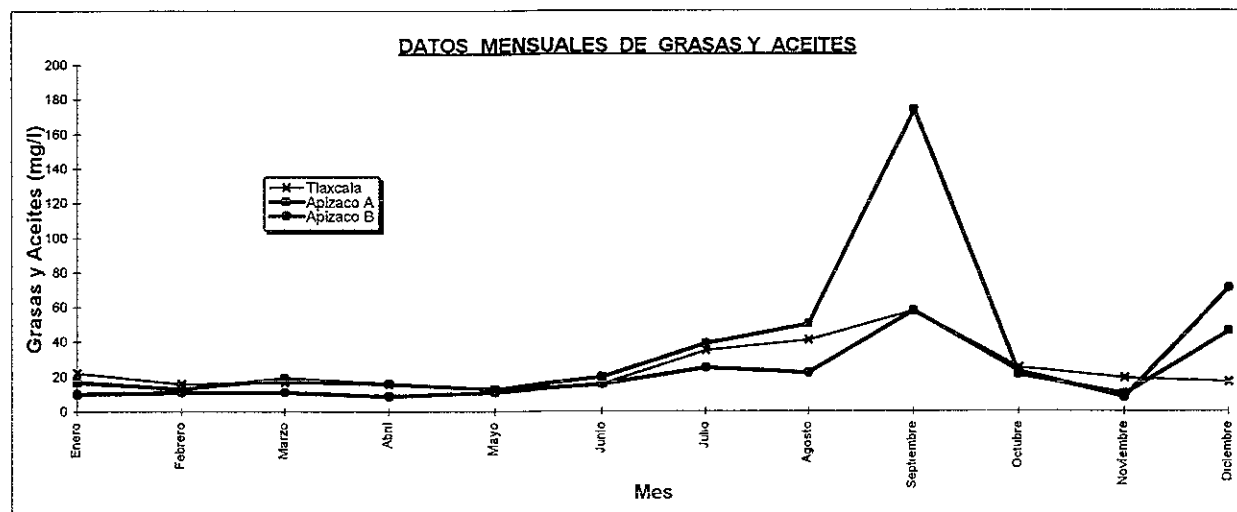
Mes/Planta	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
TLAXCALA	2.57	3.68	3.01	4.17	4.33	4.49	4.03	5.23	3.4	9.93	6.28	4.73
APIZACO A	3.63	3.95	8.94	4.69	6.92	3.53	5.84	6.18	7.23	8.47	14.39	7.69
APIZACO B	3.44	4.01	3.15	2.32	1.73	3.43	4.1	4.16	3.4	2.89	7.88	2.77

(C.G.E.E.T, 1996).

Gráfica f)



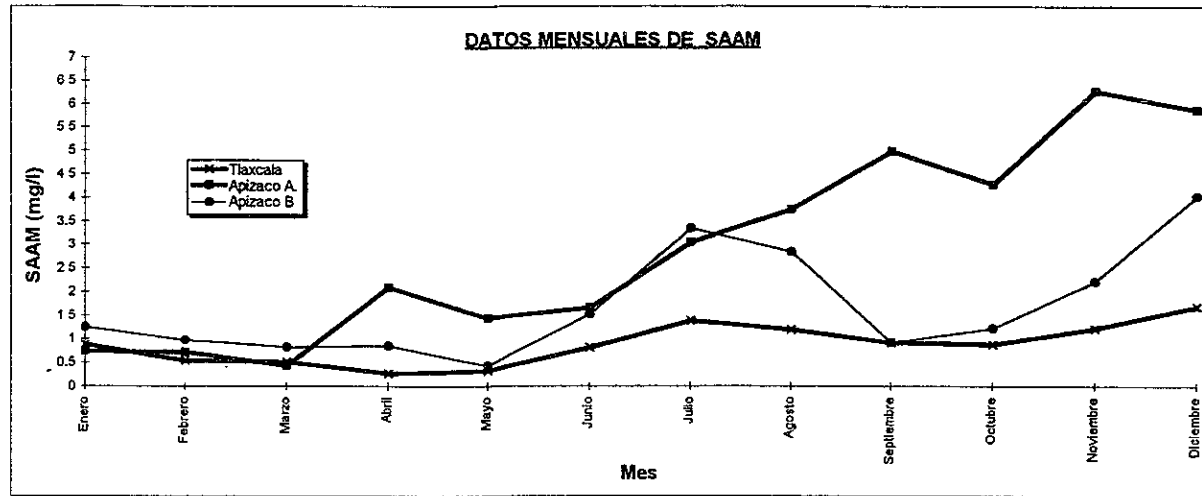
Mes/Planta	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
TLAXCALA	5.29	6.15	16.48	26.27	12.83	7.23	6.17	6.57	6.1	18.93	23.77	13.25
APIZACO A	8.85	9.14	27.97	26.24	24.45	17.81	18.06	15.55	15.67	18.14	29.46	19.58
APIZACO B	10.41	12.64	12.27	10.43	10.06	9.22	9.72	8.58	6.1	10.58	21.01	12.95



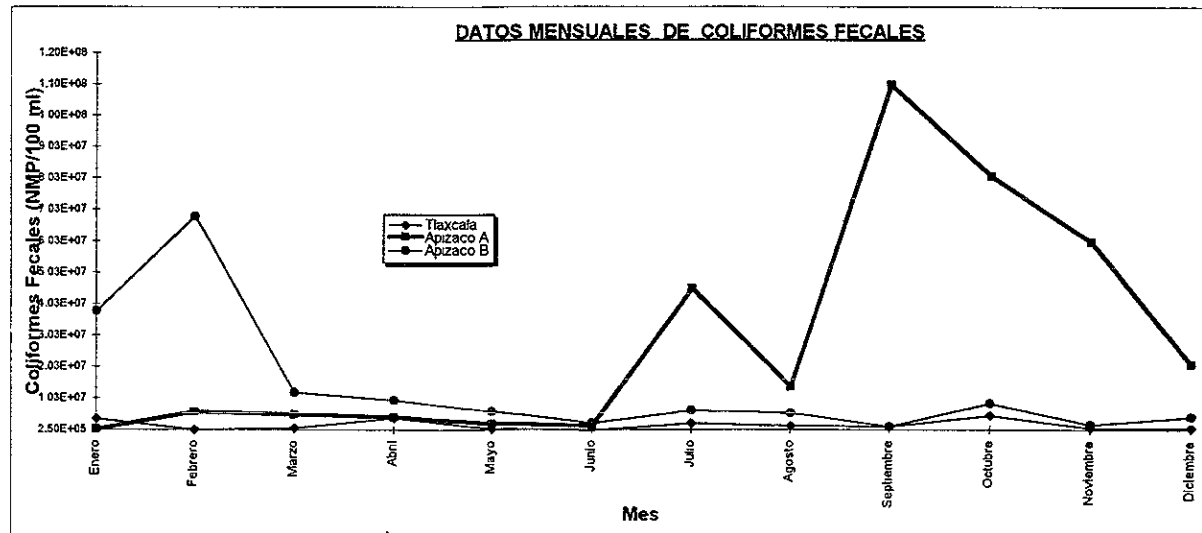
Mes/Planta	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
TLAXCALA	22	16	17	16	13	16	35	41	58	25	19	17
APIZACO A	17	13	19	16	13	20	39	50	174	21	10	46
APIZACO B	10	11	11	9	11	16	25	22	58	23	8.26	71

(C.G.E.E.T, 1996).

Gráfica g)



Mes/Planta	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
TLAXCALA	0.88	0.54	0.51	0.27	0.32	0.82	1.39	1.19	0.93	0.89	1.23	1.68
APIZACO A	0.75	0.72	0.44	2.09	1.44	1.66	3.05	3.75	4.99	4.28	6.28	5.87
APIZACO B	1.25	0.98	0.83	0.86	0.44	1.52	3.35	2.84	0.93	1.22	2.21	4.03

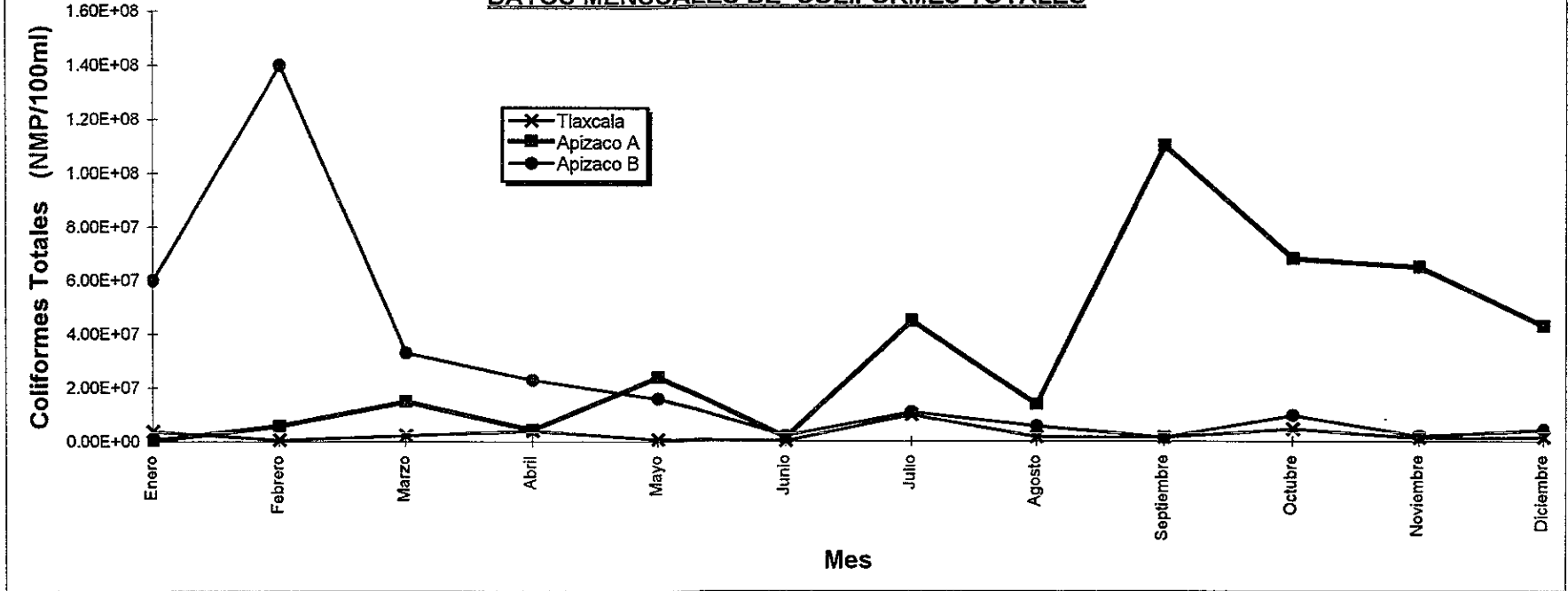


Mes/Planta	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
TLAXCALA	3.70E+06	2.50E+05	7.80E+05	4.00E+06	5.70E+05	1.10E+05	2.30E+06	1.40E+06	1.30E+06	4.70E+06	9.00E+05	9.00E+05
APIZACO A	4.70E+05	6.00E+06	5.20E+06	4.40E+06	2.20E+06	1.40E+06	4.50E+07	1.40E+07	1.10E+08	8.10E+07	6.00E+07	2.10E+07
APIZACO B	3.80E+07	6.80E+07	1.20E+07	9.60E+06	6.10E+06	2.20E+06	6.30E+06	5.60E+06	1.30E+06	8.70E+06	1.80E+06	4.30E+06

(C.G.E.E.T, 1996).

Gráfica h)

DATOS MENSUALES DE COLIFORMES TOTALES



Mes/Planta	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
TLAXCALA	3.80E+06	5.90E+05	2.30E+06	4.00E+06	9.30E+05	1.10E+05	1.00E+07	1.60E+06	1.40E+06	4.70E+06	1.30E+06	1.50E+06
APIZACO A	4.90E+05	6.00E+06	1.50E+07	4.40E+06	2.40E+07	1.40E+06	4.50E+07	1.40E+07	1.10E+08	6.80E+07	6.50E+07	4.30E+07
APIZACO B	6.00E+07	1.40E+08	3.30E+07	2.30E+07	1.60E+07	2.20E+06	1.10E+07	5.60E+06	1.40E+06	9.70E+06	2.00E+06	4.30E+06

(C.G.E.E.T, 1996).

Gráfica i)

Anexo II

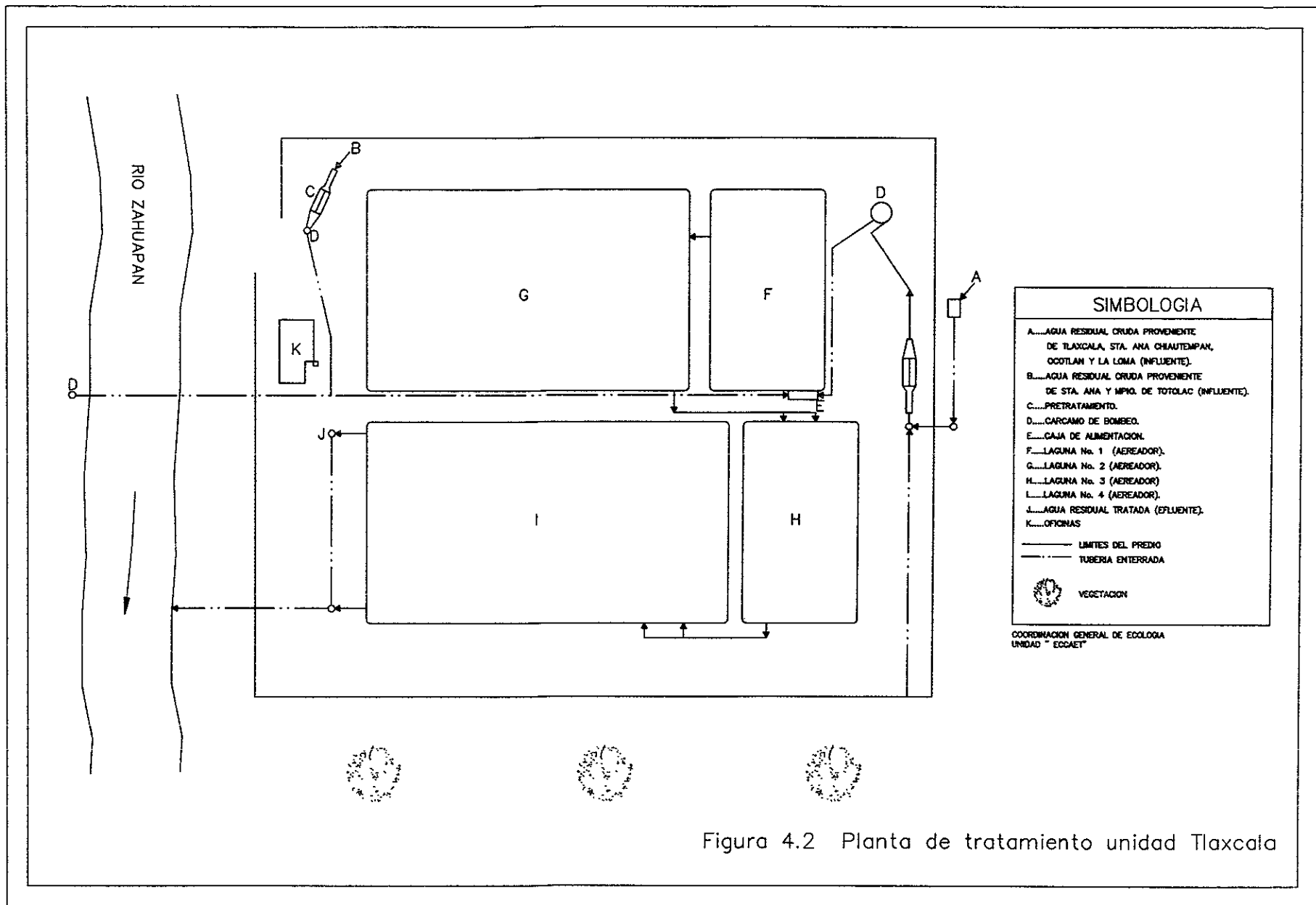


Figura 4.2 Planta de tratamiento unidad Tlaxcala

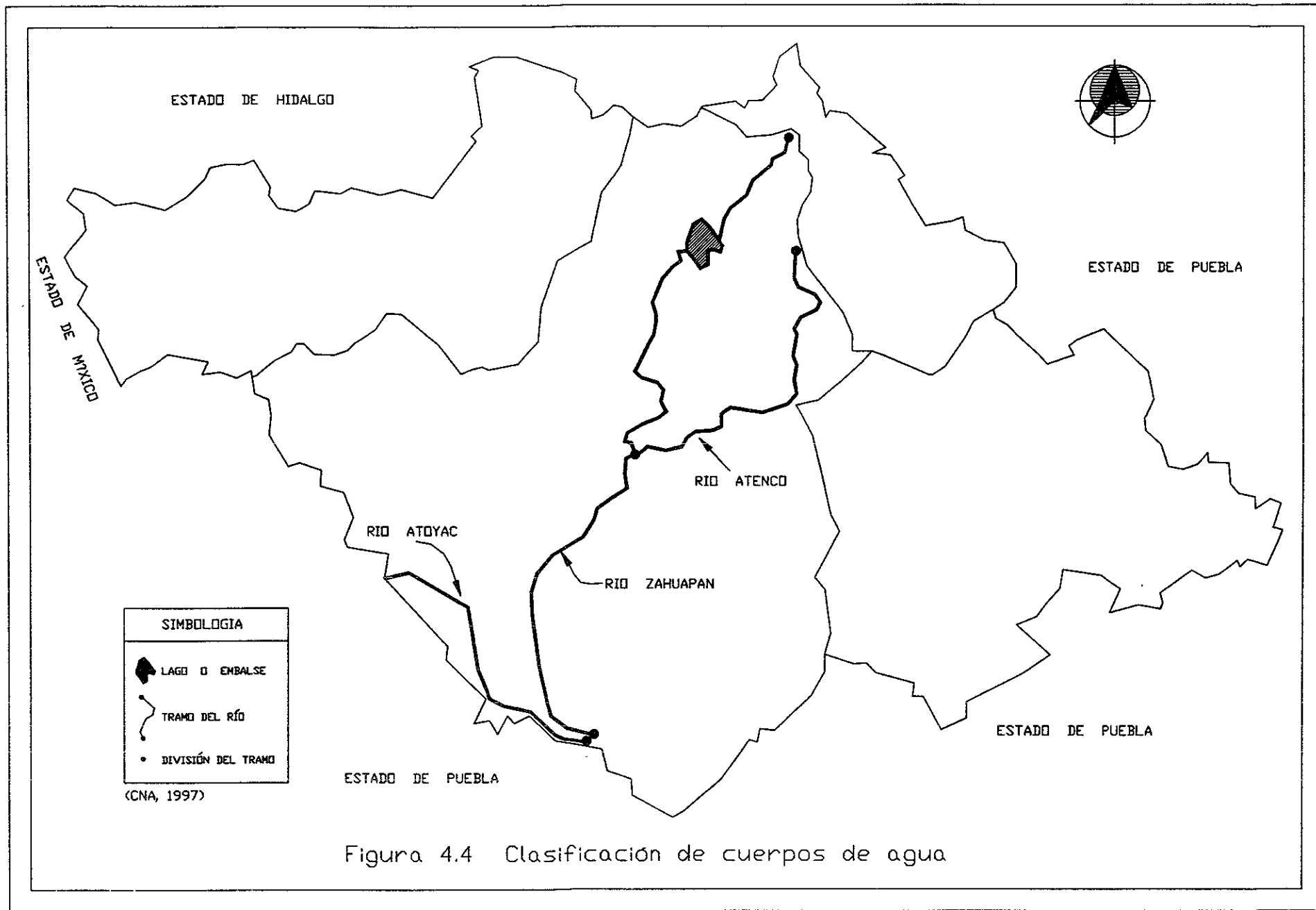


Figura 4.4 Clasificación de cuerpos de agua

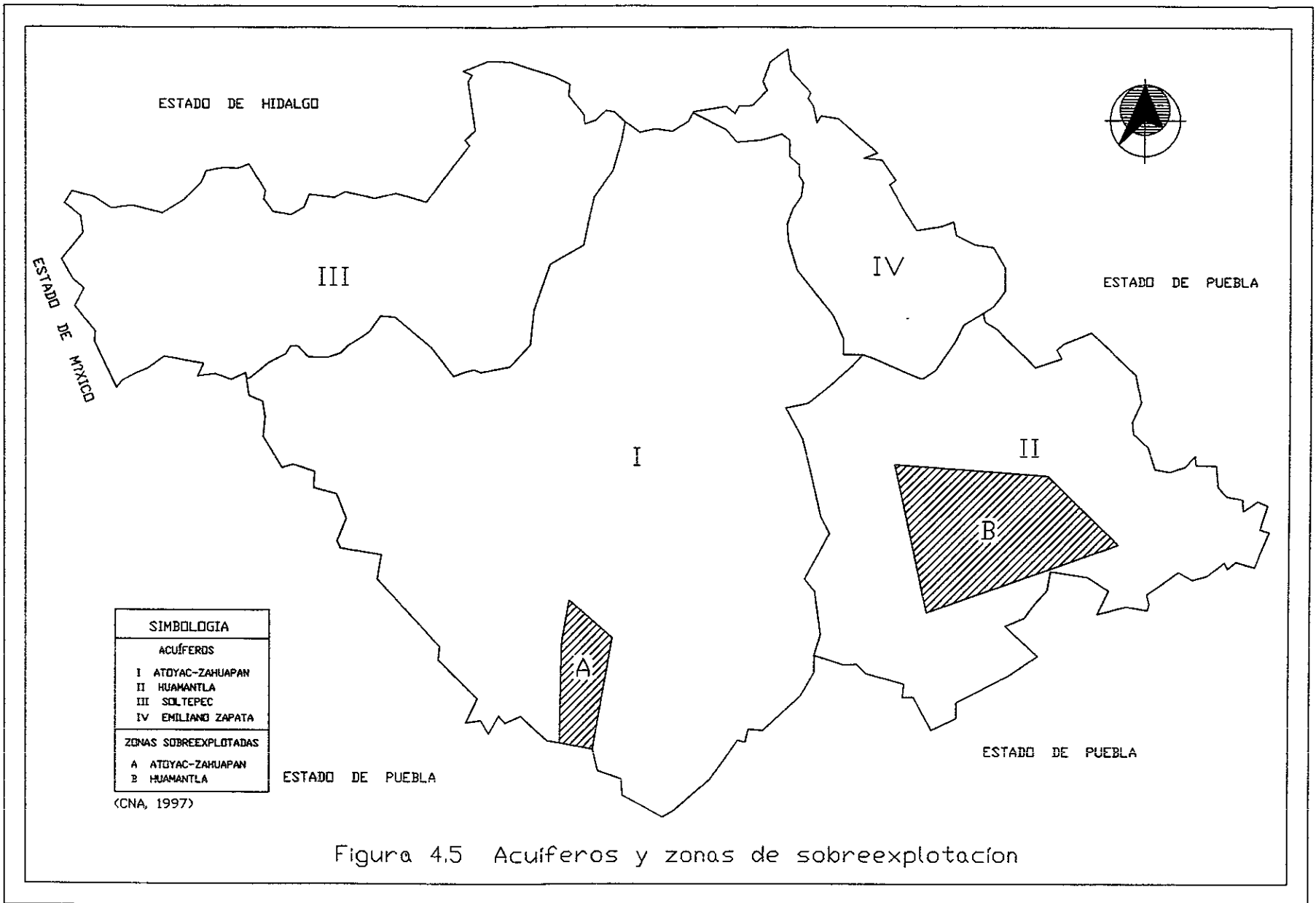


Figura 4.5 Acuíferos y zonas de sobreexplotación

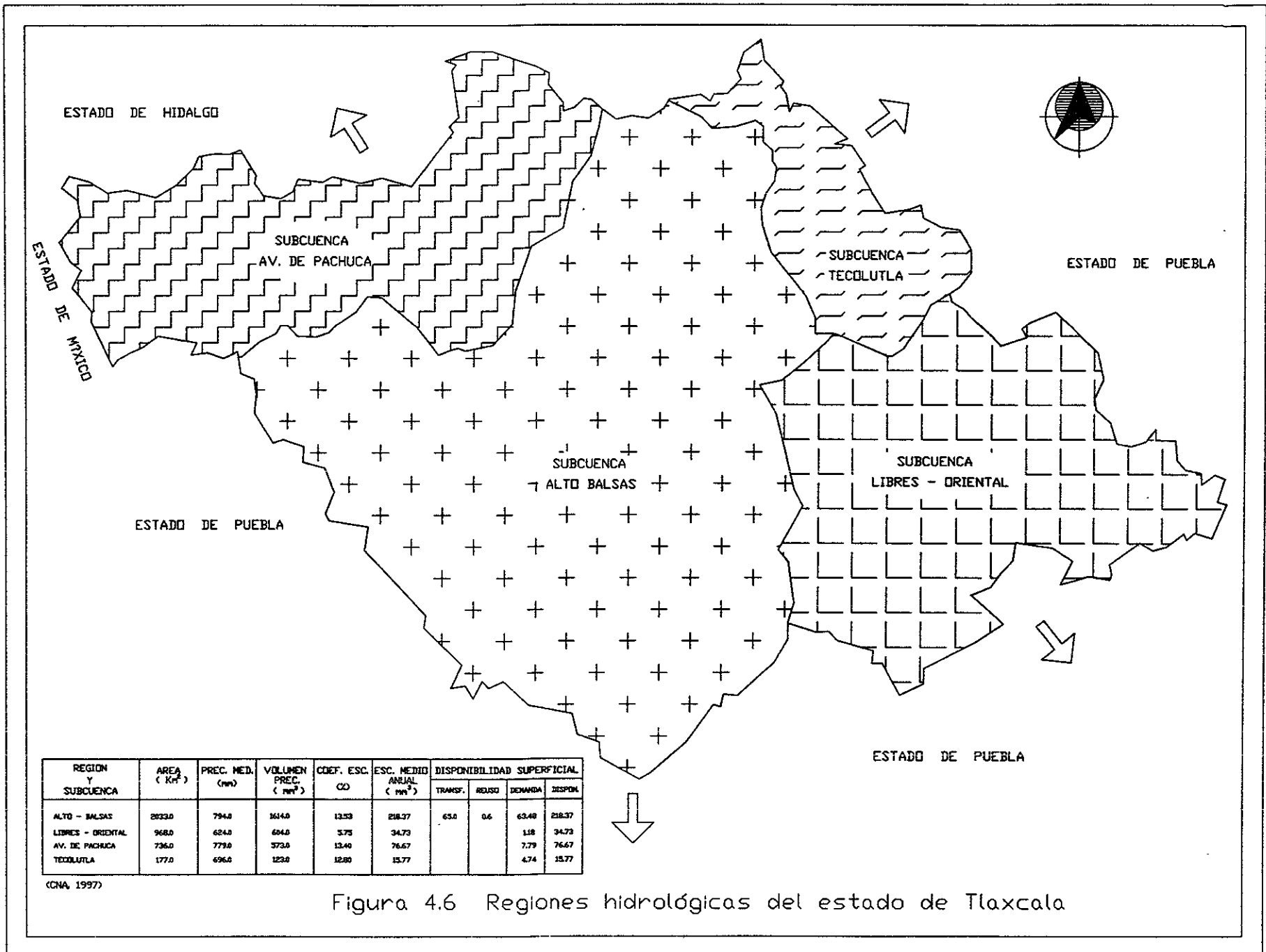


Figura 4.6 Regiones hidrológicas del estado de Tlaxcala

Anexo III

CNA (1)
 POZO AGUA POTABLE PANOTLA No. 2

PARAMETROS	UNIDADES	VALORES	OM-127-SSA1-1996	OBS.
Color	UPC	5	15	CUMPLE
Temperatura Lab.	C	19	-	-
pH	unidades de pH	7.4	6.5 - 8.5	CUMPLE
Conductividad	Mmhos/cm	920	-	-
Sólidos Sedimentables	ml/l	0	-	-
Sólidos Totales	mg/l	442	-	-
Sólidos Suspendidos Tot.	mg/l	0	-	-
Sólidos Disueltos Tot.	mg/l	442	1000	CUMPLE
Cloruros	mg/l	24.7	250	CUMPLE
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /l	393.6	-	-
Acidez Total	mg CaCO ₃ /l	19	-	-
Dureza Total	mg/l	29.2	500	CUMPLE
Dureza de Calcio	mg/l	15.9	-	-
Dureza de Magnesio	mg/l	13.3	-	-
SAAM	mg/l	0.03	0.5	CUMPLE
Fierro	mg/l	0.03	0.3	CUMPLE
Manganeso	mg/l	ND	0.1	-
Cromo Hexavalente	mg/l	ND	0.05	-
Nitratos	mg/l	4.5	10	CUMPLE
Nitritos	mg/l	ND	0.05	-
Fluoruros	mg/l	ND	1.5	-
Sulfatos	mg/l	18.9	400	CUMPLE
Coliformes Totales	NMP/100ml	SC**	2	CUMPLE
Coliformes Fecales	NMP/100ml	SC**	0	CUMPLE

** Sin Crecimiento de alguna especie
 ND- Data No proporcionado

CNA (2)
 POZO AGUA POTABLE OCOTLAN
 Fecha de muestreo y análisis 6 junio 1995

PARAMETROS	UNIDADES	VALORES	OM-127-SSA1-1996	OBS.
Color	UPC	-	-	-
Temperatura Lab/campo	C	14/18	-	-
pH	unidades de pH	7.5	6.5 - 8.5	CUMPLE
Conductividad	Mmhos/cm	150	-	-
Sólidos Sedimentables	ml/l	0	-	-
Sólidos Totales	mg/l	408	-	-
Sólidos Suspendidos Tot.	mg/l	6	-	-
Sólidos Disueltos Tot.	mg/l	432	1000	CUMPLE
Cloruros	mg/l	2.4	250	CUMPLE
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /l	80.8	-	-
Acidez Total	mg CaCO ₃ /l	4.8	-	-
Dureza Total	mg/l	73.5	500	CUMPLE
Dureza de Calcio	mg/l	34.3	-	-
Dureza de Magnesio	mg/l	39.2	-	-
SAAM	mg/l	ND	0.5	-
Fierro	mg/l	ND	0.3	-
Manganeso	mg/l	ND	0.1	-
Cromo Hexavalente	mg/l	ND	0.05	-
Nitratos	mg/l	8.8	10	CUMPLE
Nitritos	mg/l	0	0.05	CUMPLE
Fluoruros	mg/l	-	1.5	-
Sulfatos	mg/l	ND	400	-
Coliformes Totales	NMP/100ml	SC**	2	CUMPLE
Coliformes Fecales	NMP/100ml	SC**	0	CUMPLE

** Sin Crecimiento de alguna especie
 ND- Data No proporcionado

Tabla 4.10 Pozo Panotla 2 y Ocotlan

CNA (3)
 POZO AGRICOLA TEPEHITEC
 Fecha de muestreo y análisis 6 junio 1995

PARAMETROS	UNIDADES	VALORES	OM-127-SSA1-1996	OBS.
Color	UPC	-	-	-
Temperatura Lab/campo	C	14/22	-	-
pH	unidades de pH	7.7	6.5 - 8.5	CUMPLE
Conductividad	Mmhos/cm	310	-	-
Sólidos Sedimentables	ml/l	0	-	-
Sólidos Totales	mg/l	272	-	-
Sólidos Suspendidos Tot.	mg/l	12	-	-
Sólidos Disueltos Tot.	mg/l	260	1000	CUMPLE
Cloruros	mg/l	16.2	250	CUMPLE
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /l	161.5	-	-
Acidez Total	mg CaCO ₃ /l	8.7	-	-
Dureza Total	mg/l	182.9	500	CUMPLE
Dureza de Calcio	mg/l	94.1	-	-
Dureza de Magnesio	mg/l	88.8	-	-
SAAM	mg/l	ND	0.5	-
Hierro	mg/l	0.25	0.3	CUMPLE
Manganeso	mg/l	ND	0.1	-
Cromo Hexavalente	mg/l	ND	0.05	-
Nitratos	mg/l	12.7	10	NO CUMPLE
Nitritos	mg/l	0	0.05	CUMPLE
Fluoruros	mg/l	-	1.5	-
Sulfatos	mg/l	5.41	400	CUMPLE
Coliformes Totales	NMP/100ml	SC**	2	CUMPLE
Coliformes Fecales	NMP/100ml	SC**	0	CUMPLE

** Sin Crecimiento de alguna especie
 ND- Dato No proporcionado

CNA (4)
 POZO AGRICOLA STA. MA. IXTULCO
 Fecha de muestreo y análisis 6 junio 1995

PARAMETROS	UNIDADES	VALORES	OM-127-SSA1-1996	OBS.
Color	UPC	-	-	-
Temperatura Lab/campo	C	14/22	-	-
pH	unidades de pH	7.8	6.5 - 8.5	CUMPLE
Conductividad	Mmhos/cm	300	-	-
Sólidos Sedimentables	ml/l	0	-	-
Sólidos Totales	mg/l	280	-	-
Sólidos Suspendidos Tot	mg/l	2	-	-
Sólidos Disueltos Tot	mg/l	288	1000	CUMPLE
Cloruros	mg/l	4.8	250	CUMPLE
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /l	211.9	-	-
Acidez Total	mg CaCO ₃ /l	7.8	-	-
Dureza Total	mg/l	160.6	500	CUMPLE
Dureza de Calcio	mg/l	89.8	-	-
Dureza de Magnesio	mg/l	70.8	-	-
SAAM	mg/l	ND	0.5	-
Hierro	mg/l	0.18	0.3	CUMPLE
Manganeso	mg/l	ND	0.1	-
Cromo Hexavalente	mg/l	ND	0.05	-
Nitratos	mg/l	ND	10	-
Nitritos	mg/l	ND	0.05	-
Fluoruros	mg/l	-	1.5	-
Sulfatos	mg/l	1.58	400	CUMPLE
Coliformes Totales	NMP/100ml	SC**	2	CUMPLE
Coliformes Fecales	NMP/100ml	SC**	0	CUMPLE

** Sin Crecimiento de alguna especie
 ND- Dato No proporcionado

Tabla 4.11 Pozo Tepehitec y Sta. Maria Ixtulco

CNA (5)

POZO AGUA POTABLE LA JOYA

Fecha de muestreo y análisis 11/18 enero 1996

PARAMETROS	UNIDADES	VALORES	OM-127-SSA1-1996	OBS.
Color	UPC	5	-	-
Temperatura Lab/campo	C	14	-	-
pH	unidades de pH	6	6.5 - 8.5	NO CUMPLE
Conductividad	Mmhos/cm	150	-	-
Sólidos Sedimentables	ml/l	0	-	-
Sólidos Totales	mg/l	168	-	-
Sólidos Suspendidos Tot.	mg/l	80	-	-
Sólidos Disueltos Tot.	mg/l	188	1000	CUMPLE
Cloruros	mg/l	1.4	250	CUMPLE
Alcalinidad Total	mg CaCo ₃ /l	115.5	-	-
Acidez Total	mg CaCo ₃ /l	8.9	-	-
Dureza Total	mg/l	89.8	500	CUMPLE
Dureza de Calcio	mg/l	49	-	-
Dureza de Magnesio	mg/l	40.8	-	-
SAAM	mg/l	ND	0.5	-
Hierro	mg/l	ND	0.3	-
Manganeso	mg/l	ND	0.1	-
Cromo Hexavalente	mg/l	ND	0.05	-
Nitratos	mg/l	7.83	10	CUMPLE
Nitritos	mg/l	-	0.05	-
Fluoruros	mg/l	-	1.5	-
Sulfatos	mg/l	5	400	CUMPLE
Coliformes Totales	NMP/100ml	SC**	2	CUMPLE
Coliformes Fecales	NMP/100ml	SC**	0	CUMPLE

** Sin Crecimiento de alguna especie

ND- Dato No proporcionado

CNA (6)

POZO AGUA POTABLE LOMA BONITA

Fecha de muestreo y análisis 11/18 enero 1996

PARAMETROS	UNIDADES	VALORES	OM-127-SSA1-1996	OBS.
Color	UPC	5	-	-
Temperatura Lab/campo	C	16	-	-
pH	unidades de pH	7	6.5 - 8.5	CUMPLE
Conductividad	Mmhos/cm	200	-	-
Sólidos Sedimentables	ml/l	0	-	-
Sólidos Totales	mg/l	178	-	-
Sólidos Suspendidos Tot.	mg/l	ND	-	-
Sólidos Disueltos Tot.	mg/l	178	1000	CUMPLE
Cloruros	mg/l	1.8	250	CUMPLE
Alcalinidad Total	mg CaCo ₃ /l	188.7	-	-
Acidez Total	mg CaCo ₃ /l	7.9	-	-
Dureza Total	mg/l	108.9	500	CUMPLE
Dureza de Calcio	mg/l	65.8	-	-
Dureza de Magnesio	mg/l	43.1	-	-
SAAM	mg/l	0.085	0.5	CUMPLE
Hierro	mg/l	ND	0.3	-
Manganeso	mg/l	ND	0.1	-
Cromo Hexavalente	mg/l	ND	0.05	-
Nitratos	mg/l	4.57	10	CUMPLE
Nitritos	mg/l	-	0.05	-
Fluoruros	mg/l	-	1.5	-
Sulfatos	mg/l	ND	400	-
Coliformes Totales	NMP/100ml	10	2	NO CUMPLE
Coliformes Fecales	NMP/100ml	8	0	NO CUMPLE

** Sin Crecimiento de alguna especie

ND- Dato No proporcionado

Tabla 4.12 Pozo La Joya y Loma Bonita

CNA (7)

POZO AGUA POTABLE CENTRO EXPOSITOR

Fecha de muestreo y análisis 11/18 enero 1996

PARAMETROS	UNIDADES	VALORES	OM-127-SSA1-1996	OBS.
Color	UPC	5	-	-
Temperatura Lab/campo	C	14	-	-
pH	unidades de pH	6.5	6.5 - 8.5	CUMPLE
Conductividad	Mmhos/cm	600	-	-
Sólidos Sedimentables	ml/l	0	-	-
Sólidos Totales	mg/l	500	-	-
Sólidos Suspendedos Tot.	mg/l	30	-	-
Sólidos Disueltos Tot.	mg/l	170	1000	CUMPLE
Cloruros	mg/l	11.5	250	CUMPLE
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /l	404.8	-	-
Acidez Total	mg CaCO ₃ /l	55.1	-	-
Dureza Total	mg/l	388.8	500	CUMPLE
Dureza de Calcio	mg/l	215.6	-	-
Dureza de Magnesio	mg/l	173.2	-	-
SAAM	mg/l	0.04	0.5	CUMPLE
Hierro	mg/l	ND	0.3	-
Manganeso	mg/l	ND	0.1	-
Cromo Hexavalente	mg/l	ND	0.05	-
Nitratos	mg/l	5.08	10	CUMPLE
Nitritos	mg/l	-	0.05	-
Fluoruros	mg/l	-	1.5	-
Sulfatos	mg/l	18.57	400	CUMPLE
Coliformes Totales	NMP/100ml	SC**	2	CUMPLE
Coliformes Fecales	NMP/100ml	SC**	0	CUMPLE

** Sin Crecimiento de alguna especie

ND- Dato No proporcionado

CNA (8)

POZO AGUA POTABLE CBTyS

Fecha de muestreo y análisis 11/18 enero 1996

PARAMETROS	UNIDADES	VALORES	OM-127-SSA1-1996	OBS.
Color	UPC	5	-	-
Temperatura Lab/campo	C	18	-	-
pH	unidades de pH	6.5	6.5 - 8.5	LIMITE
Conductividad	Mmhos/cm	800	-	-
Sólidos Sedimentables	ml/l	0	-	-
Sólidos Totales	mg/l	184	-	-
Sólidos Suspendedos Tot.	mg/l	ND	-	-
Sólidos Disueltos Tot.	mg/l	184	1000	CUMPLE
Cloruros	mg/l	1.8	250	CUMPLE
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /l	184.8	-	-
Acidez Total	mg CaCO ₃ /l	8.9	-	-
Dureza Total	mg/l	110.7	500	CUMPLE
Dureza de Calcio	mg/l	60.8	-	-
Dureza de Magnesio	mg/l	49.9	-	-
SAAM	mg/l	ND	0.5	-
Hierro	mg/l	ND	0.3	-
Manganeso	mg/l	ND	0.1	-
Cromo Hexavalente	mg/l	ND	0.05	-
Nitratos	mg/l	4.8	10	CUMPLE
Nitritos	mg/l	-	0.05	-
Fluoruros	mg/l	-	1.5	-
Sulfatos	mg/l	ND	400	-
Coliformes Totales	NMP/100ml	SC**	2	CUMPLE
Coliformes Fecales	NMP/100ml	SC**	0	CUMPLE

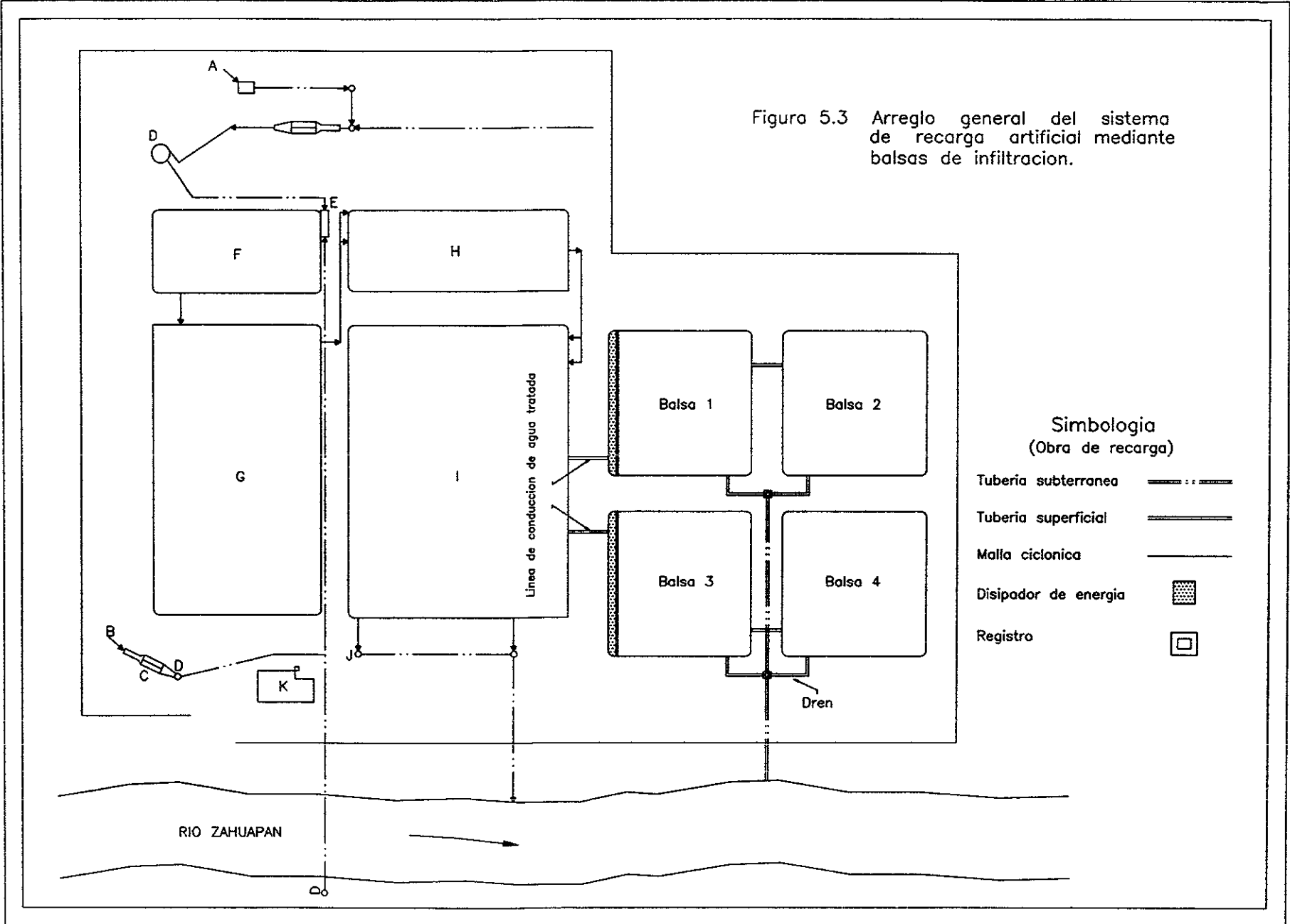
** Sin Crecimiento de alguna especie

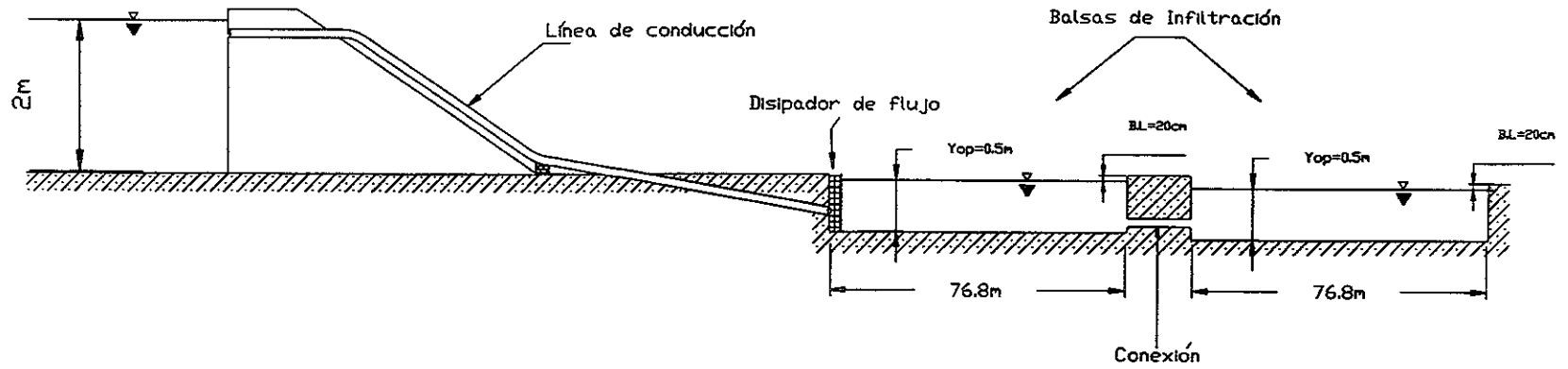
ND- Dato No proporcionado

Tabla 4.13 Pozo Centro expositor y CBTyS

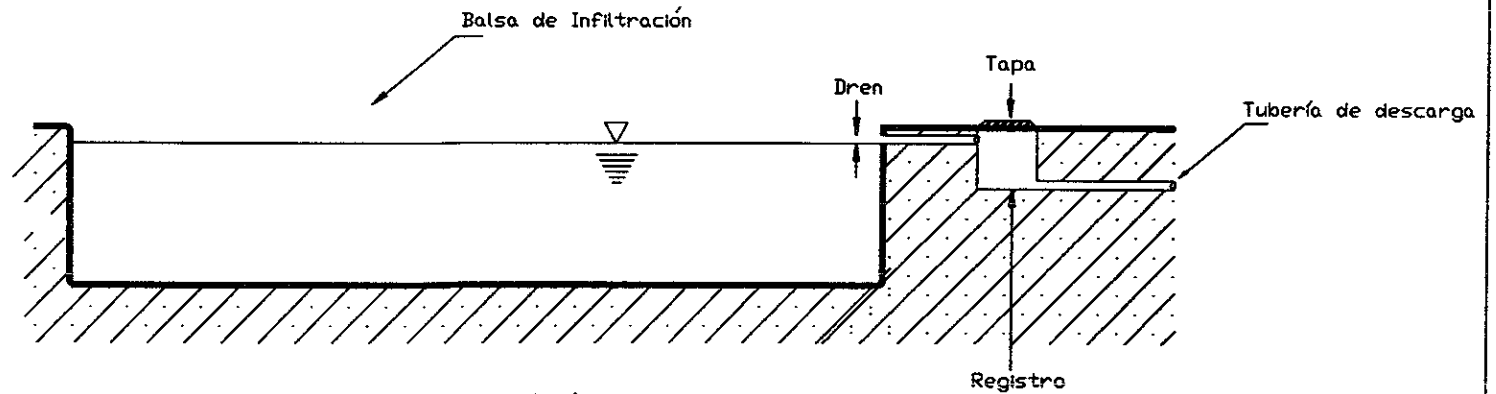
Anexo IV

Figura 5.3 Arreglo general del sistema de recarga artificial mediante balsas de infiltración.





Perfil hidráulico del abastecimiento de agua tratada



Perfil hidráulico de los Drenes

Figura 5.4 Configuración hidráulica de la obra de recarga

BIBLIOGRAFÍA

Aeppli, H & E. Schoenhals. "Los suelos de la cuenca de Puebla – Tlaxcala. Investigaciones acerca de su clasificación. El proyecto México de la Fundación Alemana para la investigación científica", 1975.

Asano, Takashi. "Artificial recharge of groundwater", California State Resources Control Board, Sacramento California, 1985.

Bianchi, W. C; Muckel, D. C. "Ground water recharge hidrology", Department of Agriculture, 1970.

Bourguet, L. "Inventaire international des aménagements d'alimentation artificielle: depouillement et synthese des réponses", BRGM 2a. serie, Paris, 1971.

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). "Impacto del uso y disposición de las aguas residuales en los acuíferos", 1994.

Comisión Nacional del Agua, Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial, Gerencia de Potabilización y Tratamiento de Agua. "Inventario nacional de plantas de tratamiento de aguas residuales (Plantas de tratamiento municipales del estado de Tlaxcala)", 1995.

Comisión Nacional del Agua. "Anteproyecto NOM-007-CNA-1996. Requisitos el Diseño, Construcción y Operación de las Obras de Recarga Artificial de Acuíferos"

Comisión Nacional del Agua. "Ley de aguas nacionales y su reglamento" 3a. Ed. 1996.

Comisión Nacional del Agua. "Perforación de pozos. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento". Libro V, 3.3.1, 1994.

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Porrua, 1994.

Coordinación General de Ecología en el estado de Tlaxcala, Dirección de Operación, Unidad ECCAET. "Caracterización fisicoquímica de 6 plantas de tratamiento en el estado de Tlaxcala", Departamento de laboratorio, 1996.

Custodio Gimena Emilio, "Hidrología Subterránea", Barcelona, 1976.

Diario Oficial "NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización". Jueves 18 de Enero de 1996.

Diario Oficial, "NOM-001-ECOL-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales". Lunes 24 de Junio de 1996.

Diccionario geomorfológico, UNAM, 1989.

Dominguez Guzman, Jose Francisco. Comunicación verbal. Jefe del departamento de agua subterránea. CNA, Tlaxcala, 1997.

Echeverria Vaquero, Maria Patricia. "Contaminación de acuíferos", DEPFI, 1995.

Heredia Duran, Manuel. "Resumen ejecutivo, agua", 1997

Hickey, J. J. & Ehrlich, G. G. "Subsurface injection of treated sewage into a saline – water aquifer at St Petesburg, Florida", 1984.

INEGI (1997). Página de internet,
<http://www.conabio.gob.mx/textos/tlax.htm#super>

INEGI y SPP, "Síntesis geográfica del estado de Tlaxcala", 1982.

Iturbe, Rosario. "Agua subterránea y contaminación", 1992.

Legorreta, Jorge. "Agua de lluvia, la llave del futuro en el Valle de México", La Jornada 1997.

Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), 13a. ed. México, 1997.

Mesa redonda sobre metrología y normalización en la electrónica y las telecomunicaciones, "Mesas redondas sobre: Metrología y normalización de la electrónica y las telecomunicaciones, la situación presentes y futura del agua subterránea en México y financiamiento para el transporte de pasajeros, en zonas urbanas y suburbanas dentro del tema problemática del desarrollo tecnológico nacional: memoria", CONACYT, 1989.

Metcalf and Eddy. "Ingeniería sanitaria: Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales", Barcelona 1985.

Montgomery, H. A. C; Beard, M. J. & Baxter, K. M. "Effects of the recharge of sewage effluents upon the quality of Chalk groundwater", J. Water Poll Control Fed, 1984.

Nellor, M. H; Baird, R. B. & Smyth, J. R. "Health affects of indirect potable water reuse", J. Amer Water Works Assoc, 1985.

Organización de Naciones Unidas, "Almacenamiento y recarga artificial de aguas subterráneas", New York, 1977.

Smith, E. D.; Sweazy, R. M; Whestone, G. A. & Ramsey, R. H. "A study of the reuse of used water", 1979.

Touissant, B. "Ground water recharge in the municipal forest of the City of Langen (Lower Mian Region) by advanced treated wastewater", 1985.

Villaseñor, Eduardo. Comunicación verbal. Jefe del departamento técnico de la planta de tratamiento de Tlaxcala, unidad ECCAET, 1997.

Werner, Gerd. "Los suelos en el estado de Tlaxcala, altiplano central mexicano", 1992.

Wright, K. R. & Rovey, C. K. " Land application of waste – state of the art", 1979.