



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO COMO PARTE DE LA
GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL
VALLE DE MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

RODOLFO SALVADOR DELGADILLO

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. ALMA CHÁVEZ MEJÍA

México, D.F. octubre de 2013





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/106/13

Señor
RODOLFO SALVADOR DELGADILLO
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora DRA. ALMA CHÁVEZ MEJÍA, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO COMO PARTE DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL VALLE DE MÉXICO"

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
- II. GESTIÓN DE LA RECARGA DE LOS ACUÍFEROS (GRA)
- III. CALIDAD Y NORMATIVIDAD DEL AGUA PARA REINYECCIÓN
- IV. CASOS PRÁCTICOS DE REINYECCIÓN
- V. PROPUESTA DE UN DISPOSITIVO DE RECARGA
- VI. METODOLOGÍA
- VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN
- VIII. CONCLUSIONES
- APÉNDICE
- BIBLIOGRAFÍA

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 HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 3 de septiembre del 2013.
EL PRESIDENTE


M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH*gar.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar al Instituto de Ingeniería de la UNAM, y a los que ahí desempeñan su labor, especialmente a la Doctora Alma Chávez, por su constante apoyo brindado a este trabajo y por darme la oportunidad de incorporarme al proyecto *“Reuso del agua del manantial de Cerro Colorado (Valle de Tula) para la recarga del acuífero del Valle de México”*, convenio ICYTDF/63/2010 e ICyTDF/113/2012, y por permitirme colaborar en el Grupo Tratamiento y Reúso donde aprendí a trabajar en equipo, rodeado siempre de buenos amigos.

A la Facultad de Ingeniería de la UNAM, a sus excelentes profesores y maestros de vida, en particular a Jose Manuel Covarrubias, Juan Ocariz, Enrique César, Alba Vázquez, Adriana Caffaggi y Oscar Vega a quienes recuerdo con gran cariño. Al ingeniero Antonio Murrieta Necochea por su invaluable apoyo y enseñanzas que no se encuentran en ningún aula.

A mi familia, en especial a mis padres Valentina y Rodolfo, por su incondicional apoyo y paciencia formándome desde el momento en que vine al mundo. A Victoria por ser ejemplo de perseverancia, a Eladio por mostrarme el valor de la dedicación, a Edith por inculcarme los valores que nos hacen ser humanos y a mi papá Rol por ser el Maestro Ingeniero que más admiro.

A la Universidad Nacional, por haberme brindado todo.

CONTENIDO

RESUMEN	3
OBJETIVO	4
I. INTRODUCCIÓN	5
II. ANTECEDENTES	6
II.1. SITUACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO	7
II.2. GESTIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA COMO PARTE DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS	10
II.3. PROBLEMÁTICA DEL VALLE DE MÉXICO	14
III. GESTIÓN DE LA RECARGA DE LOS ACUÍFEROS (GRA)	20
III.1. OBJETIVOS DE GESTIONAR LA RECARGA DE LOS ACUÍFEROS.....	21
III.2. FACTORES QUE AFECTAN LOS PROCESOS DE RECARGA	21
III.3. FUENTES DEL AGUA DE RECARGA	24
III.4. PROCESOS DE RECARGA.....	26
IV. CALIDAD Y NORMATIVIDAD DEL AGUA PARA REINYECCIÓN	31
IV.1. ESTADOS UNIDOS (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY)	31
IV.2. UNIÓN EUROPEA (WATER FRAMEWORK DIRECTIVE, WFD).....	32
IV.3. BRASIL (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE).....	33
IV.4. MÉXICO (CONAGUA)	34
IV.5. RESUMEN.....	37
V. CASOS PRÁCTICOS DE REINYECCIÓN	38
V.1. EL PASO, TEXAS: EL PRIMERO DE EE.UU.....	38
V.2. WINDHOEK, NAMIBIA: INTEGRACIÓN DE LA RECARGA ARTIFICIAL EN LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS	41
V.3. ADELAIDA, AUSTRALIA: RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO CON AGUA TRATADA	42
V.4. SAN LUIS RÍO COLORADO, SONORA, MÉXICO: RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO MEDIANTE LAGUNAS DE INFILTRACIÓN CON AGUA RESIDUAL TRATADA	45
V.5. IZTAPALAPA, CIUDAD DE MÉXICO: RECARGA ARTIFICIAL DIRECTA USANDO AGUA RESIDUAL TRATADA.....	48
VI. PROPUESTA DE UN DISPOSITIVO DE RECARGA	50
VI.1. OBJETIVO DE LA RECARGA DEL ACUÍFERO	50
VI.2. ACUÍFERO A RECARGAR	50
VI.3. DISPOSITIVO DE RECARGA.....	52
VI.4. FUENTE DEL AGUA DE RECARGA.....	52
VII. METODOLOGÍA	58
VII.1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DEL MANANTIAL CERRO COLORADO.....	58
VII.2. SELECCIÓN DE LA MEMBRANA	59
VII.3. PRETRATAMIENTO	60
VII.4. TRATAMIENTO DEL AGUA DEL MANANTIAL CERRO COLORADO MEDIANTE UN SISTEMA DE MEMBRANA DE NANOFILTRACIÓN	61

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
VIII.1. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE MANANTIAL CERRO COLORADO	63
VIII.2. RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DEL MANANTIAL CERRO COLORADO MEDIANTE UN SISTEMA DE MEMBRANA DE NANOFILTRACIÓN	65
VIII.3. RE ABASTECIMIENTO A LA RED DE AGUA POTABLE.....	71
IX. CONCLUSIONES	72
IX.1. RECOMENDACIONES	73
X. APÉNDICE.....	74
X.1. CARACTERÍSTICAS, VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PROCESOS DE REINYECCIÓN AL ACUÍFERO.....	74
X.2. PARÁMETROS DE CALIDAD INDICADOS POR LAS NORMAS INTERNACIONALES PARA EL AGUA DE RECARGA	85
X.3. ARTÍCULOS DE DIVULGACIÓN	95
XI. TRABAJOS CITADOS	96

RESUMEN

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México es una de las urbes más pobladas del mundo, exige una gran demanda de agua y desecha así también, un volumen enorme de residuos líquidos. Por un lado, el abastecimiento no es suficiente a pesar de que se ha recurrido a la importación de agua desde otras cuencas (Sistema Lerma-Cutzamala), y por otro, la disposición del agua residual sin tratar es un problema que ha afectado a la zona del Valle de Tula por más de 100 años.

Con una población en constante crecimiento, suministrar el agua en la cantidad y calidad necesaria y disponer los desechos adecuadamente, requiere de técnicas de planeación y administración como nunca se han implementado en la zona.

La Gestión Integral o Integrada de los Recursos Hídricos (IWRM por sus siglas en inglés) es un modelo propuesto por la Organización de las Naciones Unidas ante el panorama mundial y futuro del agua. Consiste en desarrollar y eficientar la administración de los recursos para asegurar la sustentabilidad. Ello consiste no sólo en resolver los problemas técnicos que impiden la justa distribución del agua, sino en implementar las estrategias y políticas públicas que permitan hacer un uso más razonable del recurso.

En el presente trabajo se analiza la herramienta conocida como Gestión de la Recarga del Acuífero (MAR por sus siglas en inglés), técnica poco utilizada en México y que permitiría en el caso de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México cerrar el círculo virtuoso de la gestión del agua.

Se presentan los diversos factores que afectan la recarga al acuífero, las legislaciones internacionales en materia de recarga, y se analizan cinco casos prácticos de recarga en México y el mundo, relacionados con el caso de estudio.

Así mismo se hicieron pruebas de tratabilidad mediante sistemas de nanofiltración al agua contenida en el subsuelo del Valle de Tula (producto de la recarga accidental por disposición de agua residual originada en la ZMCM), y se comparó la calidad resultante con los parámetros requeridos para la recarga del acuífero, según la legislación mexicana, directamente del suelo y tras un proceso de tratamiento especializado.

Con base en el análisis de la información, se llegó a la conclusión que en el caso de estudio (ZMCM) es factible implementar un dispositivo de recarga profunda, que utilice agua proveniente del subsuelo saturado del Valle de Tula y que, tras un adecuado tratamiento, se reinyecte en el subsuelo capitalino.

Esta medida mitigaría el impacto ambiental en la zona de Tula, reduciría el grado de sobreexplotación del acuífero de la Ciudad de México, contrarrestaría el efecto del hundimiento debido a la extracción indiscriminada de agua del acuífero, mejoraría los parámetros de calidad del agua contenida actualmente en el acuífero capitalino y aseguraría el abastecimiento a la Ciudad de México.

OBJETIVO

Plantear la Recarga Artificial del Acuífero como un proceso esencial dentro de la Gestión Integral de los Recursos Hídricos en el Valle de México.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Exponer los fundamentos de la Recarga Artificial del Acuífero, los distintos procesos usados, sus beneficios y limitaciones, así como estudiar la posibilidad de establecer un dispositivo de recarga en la Zona Metropolitana del Valle de México.

Comparar las normas que regulan los procesos de recarga artificial del acuífero en México con la normatividad en el ámbito internacional, especialmente en cuanto a los parámetros de calidad requeridos.

Determinar en su caso, el sistema de barreras múltiples que se requiere dar al agua de recarga para cumplir con los parámetros de calidad exigidos por la norma nacional.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para los seres humanos; su correcta administración es una obligación de todos quienes hacemos uso de ella. Cuando se trata del abastecimiento de una de las ciudades más grandes del mundo, como es la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), cumplir esa necesidad tan básica se vuelve un gran reto.

La Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) es un concepto de reciente creación, cuyo objetivo es la administración y desarrollo de la tecnología relacionada con el agua, maximizando los resultados económicos y el bienestar social, sin comprometer la sustentabilidad del medio ambiente.

Con miras a implementar una adecuada gestión de los recursos hídricos en el Valle de México, en este estudio se realizó el análisis de un elemento que puede ser uno de los eslabones fundamentales para cerrar el ciclo de la correcta administración del agua: la recarga artificial del acuífero de la Ciudad de México. El trabajo consta de once capítulos comenzando con la presente introducción.

En el siguiente capítulo se presenta la situación del agua en México y en la ZMVM, así mismo se describe el esquema de la Gestión Integral de los Recursos Hídricos según la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y el papel que juega la administración del agua subterránea dentro de este esquema.

En el capítulo tres se desarrolla el tema de la Gestión de la Recarga de los Acuíferos (GRA), los factores que intervienen en la recarga y los distintos procesos usados mundialmente. En el cuarto capítulo, se habla de los organismos reguladores y las normas nacionales e internacionales que rigen los procesos de recarga subterránea, se hace además una comparación entre la legislación nacional y la existente en Estados Unidos, Brasil y la Unión Europea. En el capítulo quinto se presentan cinco casos exitosos de recarga inducida al acuífero, seleccionados según la relevancia y semejanza con el caso de la Ciudad de México.

La construcción de un dispositivo de recarga para el acuífero de la Ciudad de México, se propone en el sexto capítulo. Además se analizan los factores mencionados en capítulos anteriores con base en la información disponible.

En el capítulo VII se hace una evaluación de la calidad del agua en el sitio propuesto como fuente del agua para recarga (Manantial Cerro Colorado, Acuífero de Tula, Hidalgo), y se explica su tratamiento mediante un reactor de membranas de nanofiltración. En el capítulo posterior se presentan los resultados obtenidos de las pruebas mencionadas y se hace la discusión sobre cuál sería el tren de tratamiento más adecuado previo a recargar el agua en el acuífero de la Ciudad de México. Finalmente se exponen las conclusiones del presente trabajo.

Adicionalmente los capítulos diez y once contienen la información que conforma el apéndice así como los trabajos referenciados durante la elaboración de este estudio.

II. ANTECEDENTES

Si existe un componente característico y que define a nuestro planeta, es el agua. Utilizada incluso como base en la búsqueda de organismos vivos en otros planetas, el agua es la sustancia fundamental para la vida en la Tierra. (Pace, 2001).

El agua está ligada a todos los organismos biológicos, en todos los biomas imaginables, desde la taiga hasta el desierto, pasando por los inmensos bosques y selvas. Incluso las formas de vida más exóticas a 11,000 metros de profundidad en el mar y aquellas sobreviviendo bajo los cascos polares de los volcanes en la Antártida, la encuentran esencial (Kaufman, 2013).

El ser humano no es la excepción a la regla y depende del recurso para vivir, para ello, el agua debe de cumplir con parámetros de calidad para su consumo.

El agua cubre el 71% de la superficie terrestre. Los océanos y mares concentran el 96.5% del agua total, los glaciares y casquetes polares contienen el 1.74%, los depósitos subterráneos el 1.72%, mientras que la suma del agua contenida en lagos, ríos, embalses, atmósfera y seres vivos, representa apenas el 0.04% del total (Figura 1). La fracción de agua dulce y disponible para el consumo humano es de alrededor del 1% (Shiklomanov, 1993).

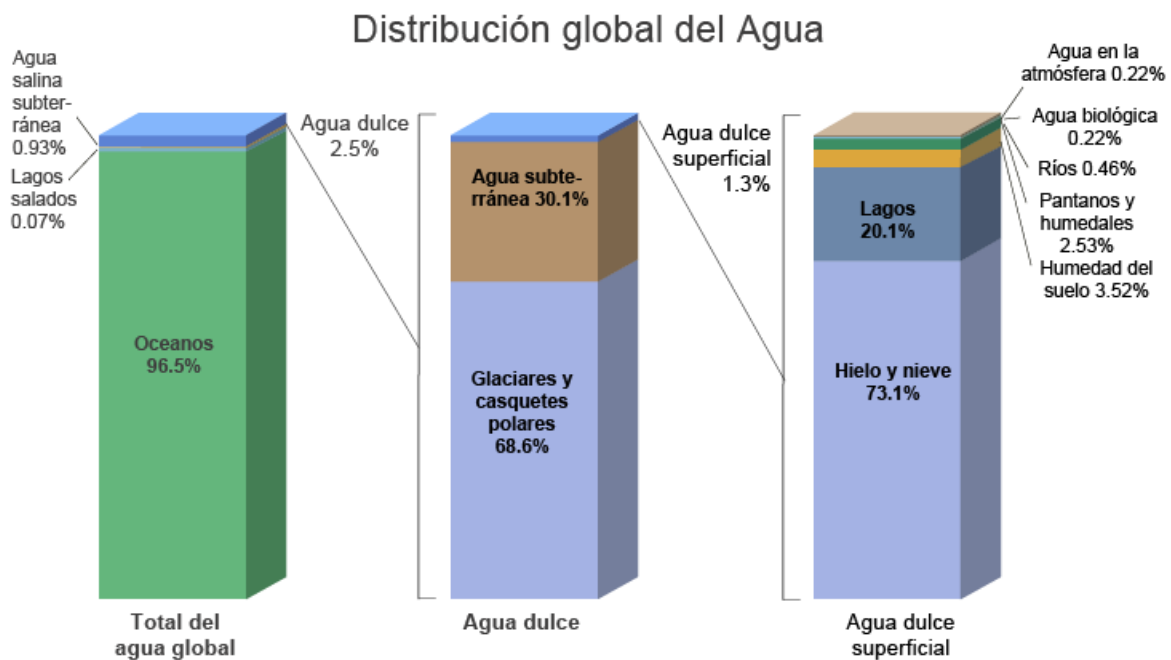


Figura 1. Distribución global del agua. Fuente: (Shiklomanov, 1993).

Del agua dulce disponible, un 68.6% se encuentra en los casquetes polares, 30.1% en los depósitos subterráneos (acuíferos) y tan sólo el 1.3% se encuentra en la superficie terrestre. En la actualidad, no es posible obtener una cantidad significativa de agua de los cascos polares y glaciares, sin que ello implique un costo excesivo además de un impacto

ambiental muy elevado (sin mencionar que México no cuenta con este tipo de recursos hidráulicos). Por ende, los acuíferos son las reservas de agua más grandes que tenemos y deben dárseles todas las condiciones para su conservación.

II.1. SITUACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO

La precipitación media en el territorio nacional es de 775 mm, equivalentes a 1,513 km³ (Comisión Nacional del Agua, 2008). De esta cantidad, 1,084 km³ se evapotranspiran¹ y el escurrimiento superficial medio es de 400 km³, de los cuales se aprovechan 47 km³. Es importante señalar que México recibe de Estados Unidos y Guatemala 50 km³, y exporta hacia Estados Unidos 0.44 km³ de acuerdo con el Tratado de Aguas de 1944. Por otro lado, los acuíferos reciben una recarga de 78 km³ y se les extraen 28 km³ (Comisión Nacional del Agua, 2011).

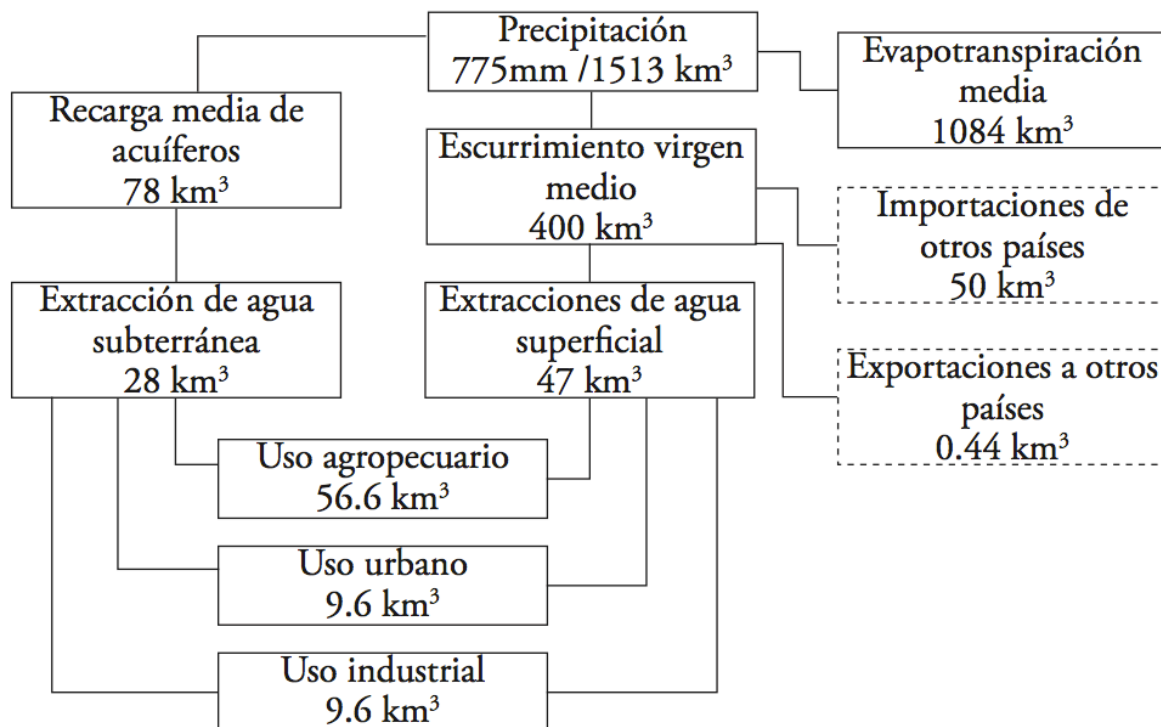


Figura 2. Balance Hídrico Nacional. Fuente (Arreguín, et. al., 2010)

Si bien México es un país con una amplia disponibilidad de agua per cápita con respecto a otros países (ONU para la Alimentación y la Agricultura, 2013), su distribución al interior del país es muy desigual; la zonas norte y centro del país, aportadoras del 70% del Producto Interno Bruto nacional (PIB), concentran el 22.1% del agua renovable mientras que las regiones sur y sureste de México tienen el 77.9% del recurso. Tan sólo la Zona

¹ Evotranspiración: es la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa, más la pérdida de agua por la transpiración de la vegetación, se mide en mm por unidad de tiempo.

Metropolitana del Valle de México (ZMVM), que aporta el 20.72 % del PIB Nacional, cuenta con sólo el 0.76% del agua renovable. Por si fuera poco, la distribución temporal es también un problema, pues la mayor parte de la precipitación ocurre durante los meses de junio y septiembre, generalmente de manera torrencial, lo que dificulta también su aprovechamiento (Figura 3).

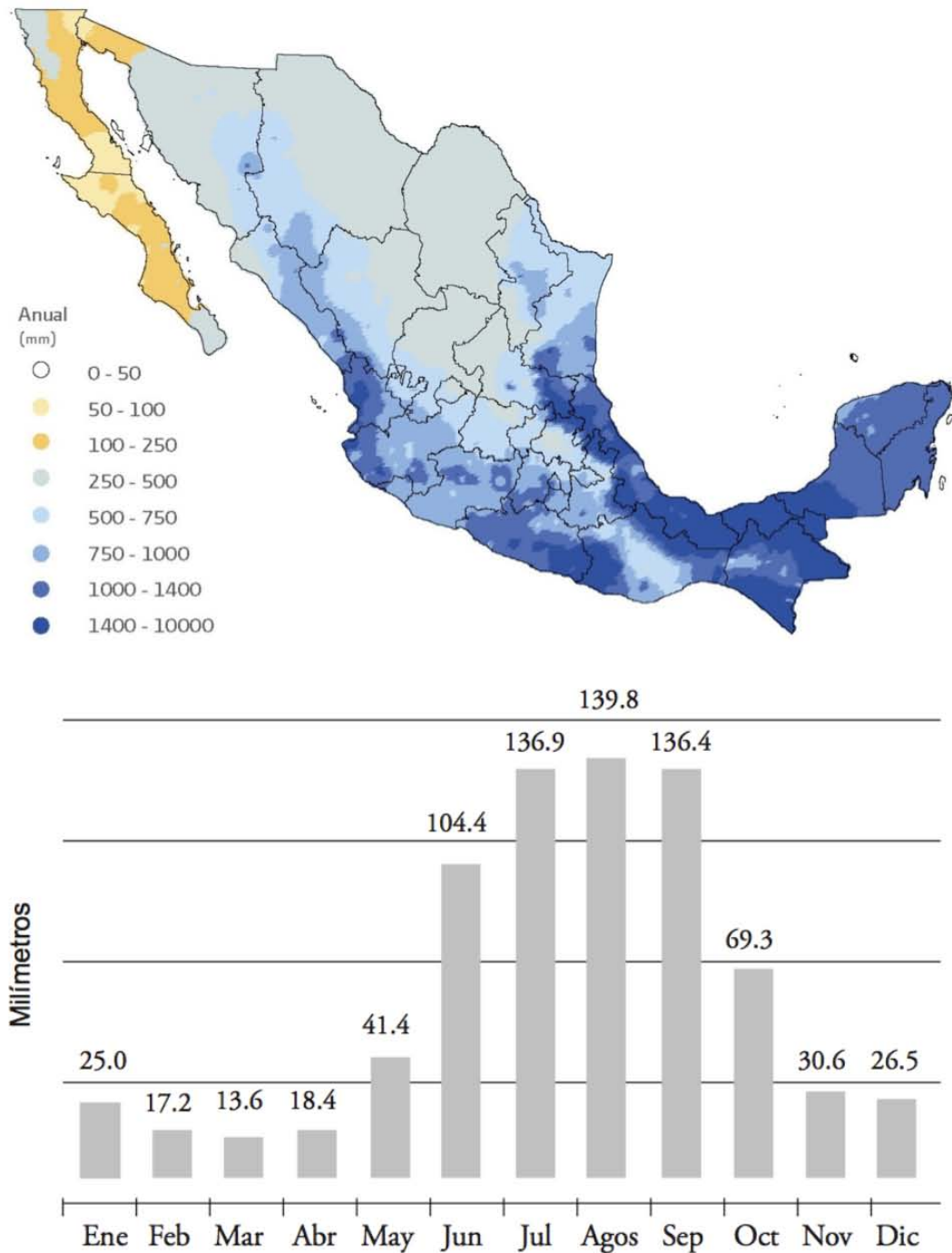


Figura 3. Distribución espacial y temporal del agua en México. Fuente: (Arreguín, et al., 2010).

A nivel nacional, la demanda anual de agua es de 78.4 miles de hectómetros cúbicos [hm³] para satisfacerla la capacidad instalada es de 66.9 mil hm³ de agua por año, mientras que existe una brecha de 11.5 mil hm³ proporcionados a base de la sobreexplotación de los mantos acuíferos y el gasto ecológico², brecha que se espera incrementarse debido al crecimiento en la demanda por consumo domiciliario, industrial y agrícola.

La disponibilidad natural media per cápita del agua ha decrecido de forma dramática en los últimos años, pasando de 18 mil metros cúbicos por habitante por año en 1950 a 4,422 metros cúbicos por habitante por año en 2010 (Comisión Nacional del Agua, 2011).



Figura 4. Grado de explotación de los acuíferos en México. Fuente: (Comisión Nacional del Agua 2009).

En México el 63% del volumen total concesionado para uso consuntivo³ es de origen superficial, no obstante importantes centros urbanos del país como Monterrey (50%; Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D., 2013), León (98.7%; Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León) y la Ciudad de México (73%; Transparencia DF) se abastecen principalmente de fuentes subterráneas.

Para su administración, las 13 regiones hidrológico-administrativas del país se han subdividido en 653 acuíferos. Debido a la extracción excesiva, 100 de los 653 acuíferos existentes, son sobreexplotados, esto es, se extrae más agua de la que se infiltra, 53.6 % del agua subterránea para todos los usos se extrae de este tipo de pozos (Comisión Nacional del Agua, 2009).

² Gasto ecológico: es la cantidad de agua que debe fluir por una cuenca para preservar los hábitats naturales, la flora, la fauna, las funciones ambientales como dilución de contaminantes, amortiguación de extremos climatológicos e hidrológicos y el paisaje.

³De acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales, "Uso Consuntivo: El volumen de agua de una calidad determinada que se consume al llevar a cabo una actividad específica, el cual se determina como la diferencia del volumen de una calidad determinada que se extrae, menos el volumen de una calidad también determinada que se descarga, y que se señalan en el título respectivo." (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 1992), es en otras palabras el agua de consumo, el agua que no se devuelve en forma inmediata al ciclo del agua. De esta manera, el riego es un uso consuntivo, mientras que la generación de energía eléctrica no lo es.

II.2. GESTIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA COMO PARTE DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

II.2.1. LA GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Cuando se tiene que lidiar con el problema de la escasez del agua, se suelen aplicar en ese orden los siguientes principios:

1. Obtener más agua. Se logra almacenando o movilizándolo en el tiempo y espacio.
2. Lograr mayor eficiencia. La meta es obtener mayor beneficio “por gota”.
3. Realizar modificaciones a las políticas del agua. Finalmente se hace una reestructuración a gran escala que puede provocar tensión y conflictos.

Según la Organización de las Naciones Unidas (2009), la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) “es un proceso que promueve la administración y el desarrollo coordinado del agua, el suelo y los otros recursos relacionados, con el fin de maximizar los resultados económicos y el bienestar social de forma equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales” (Figura 5).

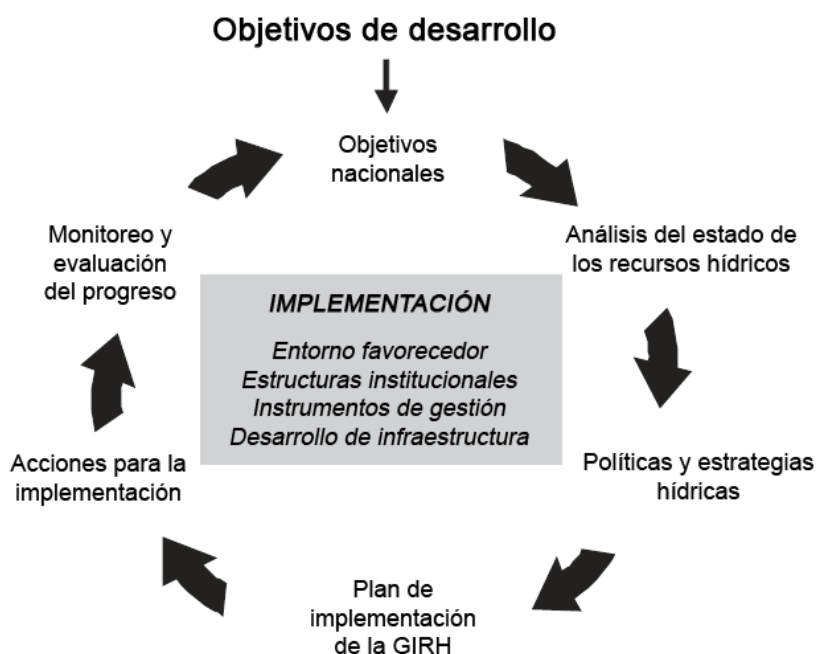


Figura 5. Esquema de la Gestión Integral de los Recursos Hídricos. Fuente: (ONU, 2009).

En su forma más simple la GIRH parte de la base de que todos los usos del agua son interdependientes: altas demandas para el riego y el posterior escurrimiento contaminado significan menos agua potable para consumo humano o su uso industrial; el agua residual municipal o industrial sin tratamiento contamina los ríos y amenaza los ecosistemas; si el

agua debe mantenerse en un río para proteger la pesca y el ecosistema, menos puede ser desviada para el riego de cultivos.

La GIRH no sólo incluye la administración de recursos físicos, a la par regula los sistemas humanos para aprovechar mejor estos recursos. En lo general la GIRH implica:

- Entender las necesidades relacionadas con el agua en un ecosistema dado.
- Identificar las actividades humanas que estén relacionadas con el agua en estos ecosistemas.
- Explorar las posibilidades de redirigir las actividades humanas de manera que se alinien con las necesidades del ecosistema.

Para adoptar la GIRH se requieren cambios en muchas áreas y a varios niveles, la Red Internacional para la Construcción de Capacidad en Gestión Integral de los Recursos Hídricos de la ONU (UN International Network for Capacity Building in IWRM 2010) propone trece áreas clave de cambio para lograr la adecuada GIRH y las agrupa en tres categorías que se describen a continuación:

I. Habilitación del marco.

1. Político. Establecer metas para el uso, protección y conservación del agua.
2. Legislativo. Las reglas para fortalecer y alcanzar las metas propuestas.
3. Financiero y estructural. Destinar recursos económicos para cumplir las necesidades de agua.

II. Roles Institucionales.

1. Crear un marco organizacional. Formas y funciones.
2. Construir capacidad institucional. Destinar recursos económicos para cumplir las necesidades de agua.

III. Instrumentos de la gestión.

1. Evaluación de los recursos hídricos. Entender los recursos existentes y las necesidades.
2. Planes para la GIRH. Opciones de desarrollo, uso del recurso e interacción humana.
3. Gestión de la demanda. Limitar la demanda incrementando la eficiencia y disminuyendo los residuos. Es uno de los elementos más importantes de la GIRH, incluye minimizar las fugas y el uso de aguas grises, entre otras técnicas.
4. Instrumentos sociales de cambio. Promoción de la cultura del agua.
5. Resolución de conflictos. Resolver disputas y asegurar el uso compartido del agua.
6. Instrumentos regulatorios. Distribución y límite del uso del agua.
7. Instrumentos económicos. Usar el valor y los precios del agua para lograr eficiencia y equidad.
8. Gestión de la información. Mejorar el conocimiento para una mejor gestión del agua.

Para aplicar los cambios necesarios es básico hacer un estudio previo de la resiliencia⁴ tanto ecológica como social, de manera que no se exceda su elasticidad; de la misma manera que el ecosistema es resiliente ante las alteraciones antropogénicas, la sociedad debe permitir las alteraciones técnicas y políticas del manejo del agua que permitan combatir su escasez y asegurar un sistema sustentable (introducción de técnicas de reúso, aumento en las tarifas, etc.) (ONU, 2010).

⁴ Resiliencia: es la capacidad de las comunidades de soportar, adaptarse y recuperarse de perturbaciones ambientales adquiriendo nuevas herramientas.

II.2.2. GESTIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

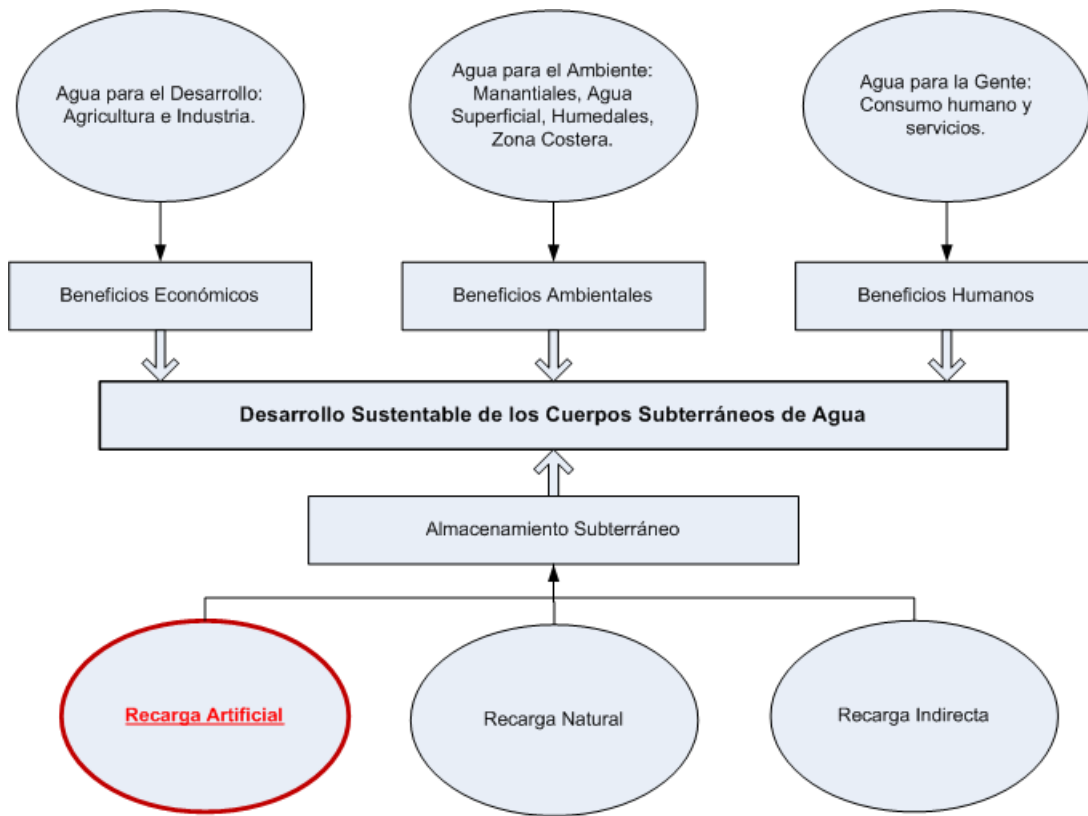


Figura 6. Desarrollo sostenible del agua subterránea. Fuente: (UN International Network for Capacity Building in IWRM 2010).

Como se expuso anteriormente, el agua subterránea representa el mayor porcentaje de agua dulce después de los glaciares y es por tanto nuestro más grande almacenamiento.

La gestión del agua subterránea tiene como fin la sustentabilidad, para ello se deben cumplir dos principios:

- Lograr el equilibrio entre la cantidad de agua recargada a los acuíferos y la cantidad extraída.
- Proteger los cuerpos de agua de la contaminación.

La recarga artificial del acuífero es la herramienta usada para lograr un equilibrio entre las recargas y descargas que sufre un acuífero (Figura 6), en la GIRH, la gestión del agua subterránea es indispensable pues:

- El agua superficial y la subterránea están fuertemente ligadas.
- El agua subterránea es más confiable que la superficial en temporada de estiaje.
- La contaminación del agua subterránea puede durar siglos, reduciendo las fuentes para las generaciones futuras.
- En la Tabla 1 se presentan algunas características, ventajas y desventajas del agua subterránea y el agua superficial.

Tabla 1. Comparativa de las características del agua subterránea y el agua superficial. Fuente: (UN International Network for Capacity Building in IWRM 2010).

Característica	Agua Subterránea	Agua Superficial
Características Hidrológicas		
Almacenamiento	Muy grande	Pequeño a moderado
Áreas de almacenamiento	Relativamente no restringidas	Restringidas a cuerpos de agua
Velocidades de flujo	Muy bajas	Moderadas a altas
Tiempo de residencia	Generalmente décadas a siglos	En su mayoría semanas a meses
Vulnerabilidad a sequías	Generalmente baja	Generalmente alta
Pérdidas por evaporación	Bajas y localizadas	Altas para almacenamientos
Evaluación del recurso	Costosas y con alta incertidumbre	Baratas y con baja incertidumbre
Impacto de la extracción	Retrasado y disperso	Inmediato
Calidad natural	Generalmente alta	Variable
Vulnerabilidad a contaminación	Variable, protección natural	Muy desprotegida
Persistencia de la contaminación	Regularmente extrema	Generalmente transitoria
Factores socioeconómicos		
Percepción pública	No perceptible, impredecible	Visible, predecible
Costo de desarrollo	Generalmente bajo	Regularmente alto
Riesgo del desarrollo	En pocas ocasiones percibido	En muchas ocasiones asumido
Tipo de desarrollo	Mixto, público y privado	En su mayoría público

Las ventajas de la correcta gestión del agua subterránea son evidentes tanto en el aspecto hidrológico como en el socioeconómico. Ello no significa que deba dejar de usarse el agua superficial, sino que debe haber una correcta administración de ambas fuentes, explotando las características que cada una tiene.

II.3. PROBLEMÁTICA DEL VALLE DE MÉXICO

Uno de los casos más evidentes de un problema en la gestión del agua sucede en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). La zona más importante para el desarrollo económico, social y político de México tiene un sistema deficiente tanto de abastecimiento como de saneamiento y reúso de sus recursos hídricos.

La población de la ZMVM es de 20,116,842 habitantes y tiene un área de 7,866 km² (CONAPO, 2010) lo que la convierte en una de las urbes más grandes del mundo. Pertenece a la región hidrológico-administrativa (RHA) XIII nominada Aguas del Valle de México que está integrada por dos cuencas, la Cuenca del Valle de México (CVM) y la del Valle de Tula (Figura 7).

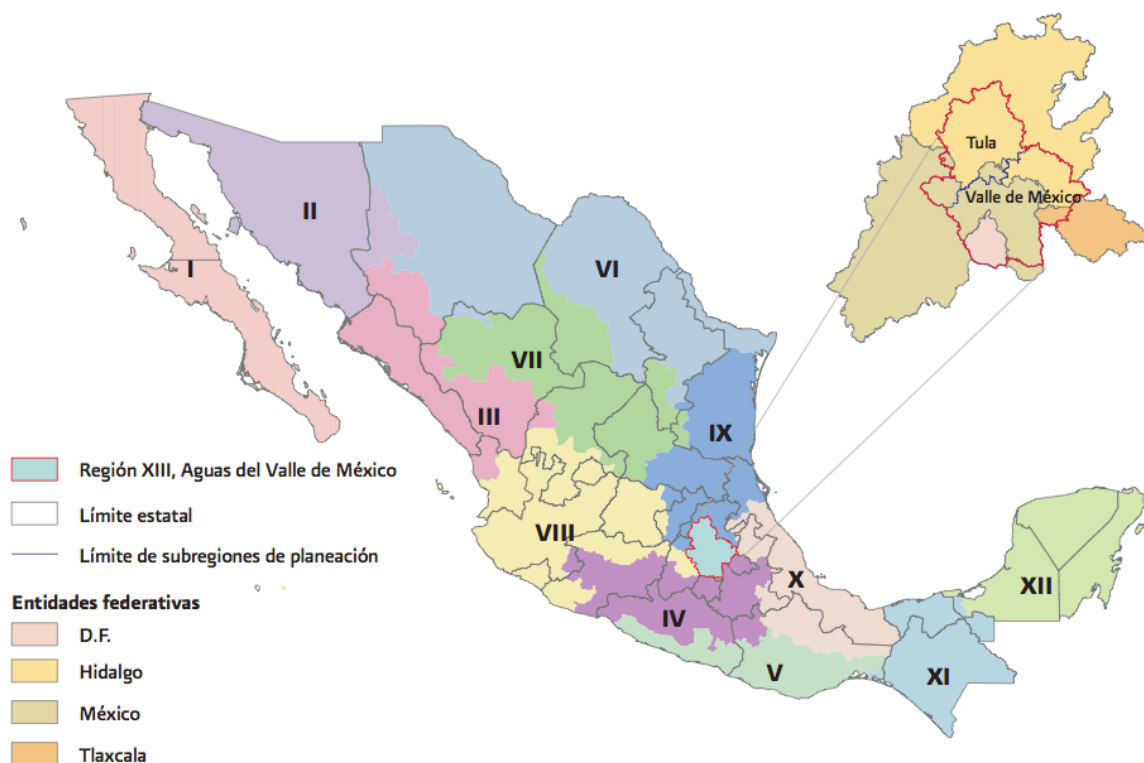


Figura 7. Mapa de la RHA XIII Aguas del Valle de México. Fuente: (Comisión Nacional del Agua 2009).

II.3.1. ABASTECIMIENTO: SOBREEXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (2013), la disponibilidad natural de agua en la CVM está compuesta por precipitaciones que ascienden a $6,828 \text{ hm}^3$ anuales, de los cuales casi tres cuartas partes regresan a la atmósfera en el proceso de evapotranspiración ($4,901 \text{ hm}^3$), la cuarta parte restante se distribuye entre los cuerpos de agua superficiales (241 hm^3) la recarga a cuerpos subterráneos (751 hm^3) y escurrimientos (937 hm^3); la disponibilidad natural, compuesta por los escurrimientos y la recarga a los acuíferos es entonces igual a $1,688 \text{ hm}^3$ anuales ($53.5 \text{ m}^3/\text{s}$).

Por otro lado, la demanda de la ZMVM según el Registro Público de Derechos del Agua asciende a $2,922 \text{ hm}^3$ ($92.7 \text{ m}^3/\text{s}$)⁵, muy superior a la disponibilidad natural de la cuenca. Dicha demanda se cubre mediante la extracción de la misma cuenca ($1,943 \text{ hm}^3$), la reutilización (359 hm^3) y la importación desde otras cuencas (Sistema Lerma-Cutzamala, 622 hm^3) (REPDA, 2013).

De la fracción extraída desde la misma cuenca del Valle de México ($1,943 \text{ hm}^3$) sólo 992 hm^3 son renovables (241 hm^3 superficiales y 751 hm^3 subterráneos), el resto, 951 hm^3

⁵ En el REPDA se inscriben los volúmenes concesionados o asignados a los usuarios de las aguas nacionales, especificando el volumen de agua a que se tiene derecho. Vale destacar que el volumen registrado no es necesariamente el que se esté utilizando; en teoría la utilización del agua puede ser inferior a la registrada en el REPDA pero nunca mayor.

(30.2 m³/s) son producto de la sobreexplotación de los acuíferos del Valle de México (Figura 8).

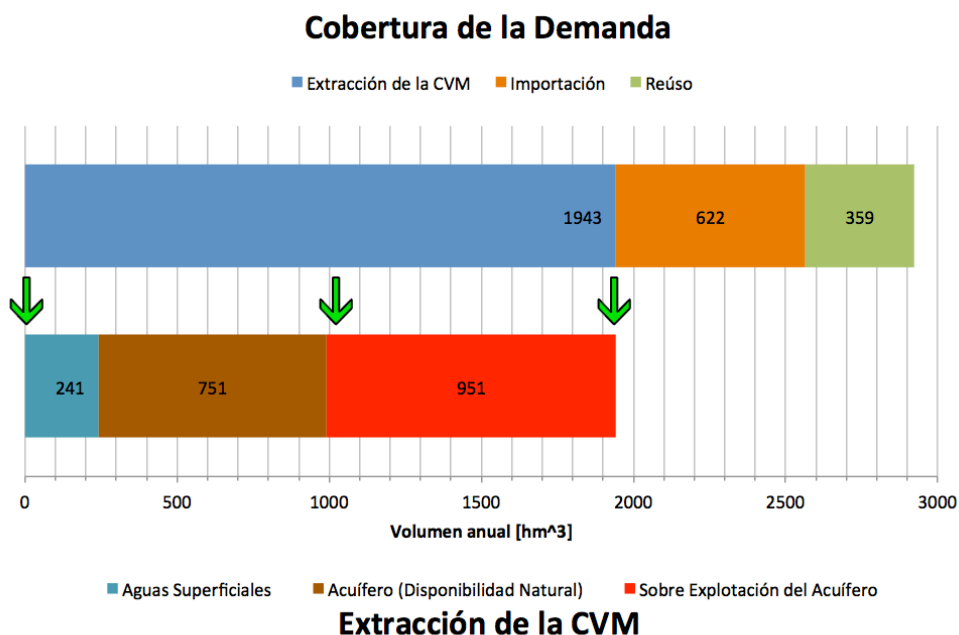


Figura 8. Gráfica de cómo se cubre la demanda de agua en la ZMVM, donde se desglosa la fracción obtenida en la propia cuenca. Fuente: Elaborada con información de CONAGUA 2004.

De los 14 acuíferos que integran la RHA XII Aguas del Valle de México (7 en la cuenca de Tula y 7 en la cuenca del Valle de México) cuatro están sometidos a sobre explotación, todos ellos en la cuenca del Valle de México (Tabla 2).

Tabla 2. Situación de los acuíferos en la subregión Valle de México. Fuente: Elaborada con información de (Comisión Nacional del Agua 2009)

Clave	Acuífero	Recarga	Descarga natural	Volumen concesionado	Disponibilidad	Grado de explotación
901	ZMCM	279	0	1,248.58	-969.58	448%
1319	Tecocomulco	27.8	0.52	0.01	27.27	0%
1320	Apan	99.3	0	7.85	91.45	8%
1506	Chalco-Amecameca	74	0	90.36	-16.36	122%
1507	Texcoco	48.6	0	92.54	-43.94	190%
1508	Cuautitlán - Pachuca	202.9	0	243.39	-40.49	120%
2902	Soltepec	19.1	0	17.85	1.25	93%
TOTAL		750.7	0.52	1,700.58	-950.40	227%

El caso más crítico es, naturalmente el de la ZMVM el que presenta un grado de explotación de 448%, esto es que se extrae casi cinco veces más agua de la que se recarga (Figura 9).

Si bien los mapas geohidrológicos son aún poco precisos, es evidente que de continuar operando un balance negativo tan grande, los acuíferos que abastecen a la Ciudad de México serán agotados eventualmente.

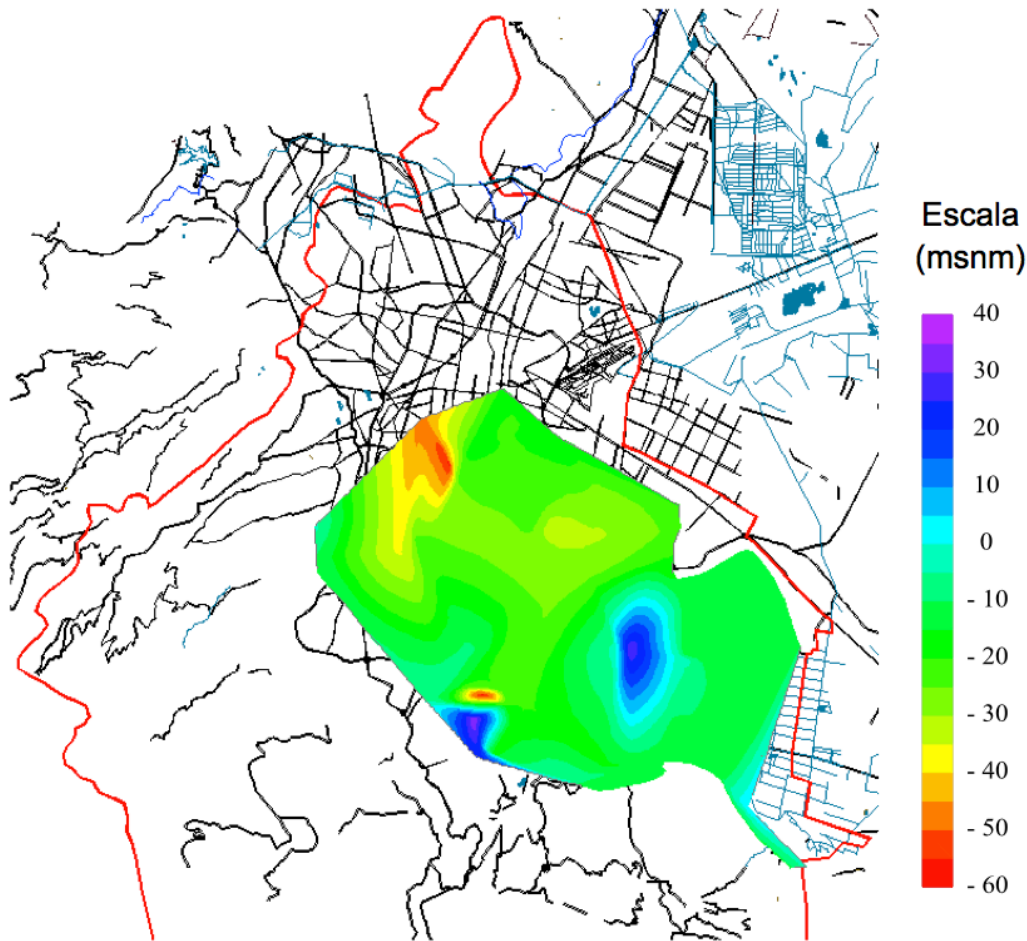


Figura 9. Evolución del nivel estático 1985-2009 del acuífero de la Ciudad de México. Fuente: (Ruíz, 2012).

A pesar de la sobreexplotación del acuífero, existen zonas de la ciudad donde el suministro no es cubierto, al año 2005 se reportaban cerca de 700,000 habitantes sin acceso a servicio de agua potable en el Valle de México (INEGI 2005).

Los problemas de abastecimiento no sólo significan escasez de agua para los consumidores, es bien sabido que las interrupciones en el servicio ocasionadas por la falta del recurso provocan grandes variaciones en la presión de operación, lo que daña las conducciones generando problemas de contaminación y fugas, fenómeno popularmente conocido como "tandeos".

Por si esto fuera poco no hay que olvidar que la población de la Zona Metropolitana del Valle de México está en continuo crecimiento (a una tasa del 1%, CONAPO, 2010), asimismo, el consumo per cápita, resultado del mejoramiento del nivel de vida de los capitalinos; la demanda del recurso en la ZMVM no puede hacer más que aumentar.

II.3.2. DISPOSICIÓN Y SANEAMIENTO: CONTAMINACIÓN DEL VALLE DE TULA

El otro gran problema relacionado con el agua en el Valle de México es la disposición y el saneamiento del agua. En el año 2008 en la Ciudad de México se trató sólo el 11.3% del agua residual generada y colectada en los sistemas municipales de alcantarillado en la región (Comisión Nacional del Agua, 2009). Una cantidad enorme de residuos domésticos e industriales no reciben tratamiento alguno y son dispuestos al noroeste de la ciudad, en el estado de Hidalgo.

Desde hace más de 100 años el Valle de Tula recibe el agua residual proveniente del drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México en una cantidad que se estima actualmente en 52 m³/s (Jiménez, et al. 2006). Esta agua se emplea para riego agrícola y parte de ella se infiltra al subsuelo durante su transporte y almacenamiento en la infraestructura agrícola así como por el propio uso en riego.

La recarga, estimada por el British Geological Survey en al menos 25 m³/s (BGS, 1998) alimenta tres acuíferos locales, a partir de los cuales surgen manantiales y pozos que abastecen a los 502,000 habitantes del Valle de Tula. Además, ha permitido el riego de 90 mil hectáreas de cultivos, generando un crecimiento dramático en la producción agrícola de la región.

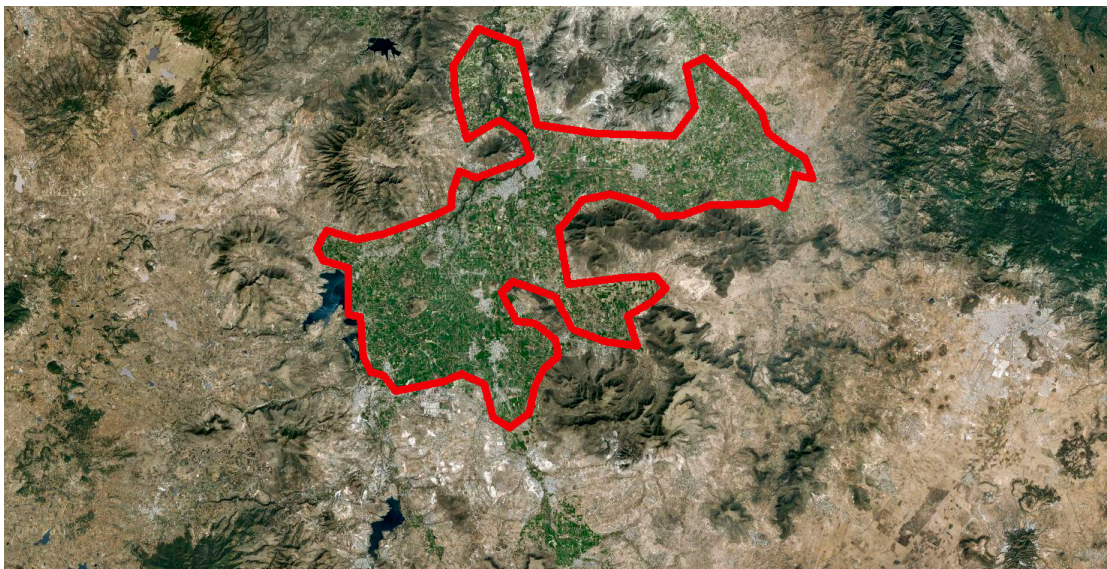


Figura 10. Imagen satelital del valle de Tula donde se aprecia claramente la zona de riego con agua residual.
Fuente: (Google Earth™ 2012).

El brote de nuevas fuentes de abastecimiento no ha sido el único efecto de la descarga indiscriminada de agua residual del Distrito Federal en el valle de Tula; el agua infiltrada al subsuelo ha provocado una contaminación perceptible del acuífero del Valle de Tula, no

sólo de contaminantes microbiológicos, físicos y químicos, sino también de contaminantes orgánicos, que además de estar poco regulados nos confirman que el agua que brota de los manantiales del Valle de Tula tiene como origen la capital del país (Jiménez, et al., 2006).

La construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Atotonilco en el estado de Hidalgo, promete ser un elemento de cambio dentro de la gestión del agua en el Valle de México al reducir la contaminación dentro del Valle de Tula, sin embargo su impacto sólo podrá medirse a largo plazo, no obstante, hay un elemento faltante que permitiría lograr un balance entre la exportación e importación del recurso en la cuenca del Valle de México y que mitigaría la sobreexplotación del acuífero de la ZMVM, cerrando el círculo virtuoso de la Gestión Integral de los Recursos Hídricos en la Ciudad de México, ello es, la recarga artificial del acuífero de la Ciudad de México con aguas tratadas provenientes del Valle de Tula.

III. GESTIÓN DE LA RECARGA DE LOS ACUÍFEROS (GRA)

La Gestión de la Recarga de los Acuíferos (GRA, o *Management of Aquifer Recharge* MAR por sus siglas en inglés) se entiende como el proceso mediante el cual se inyecta agua en un estrato permeable del suelo, que puede o no contener agua inicialmente, con el fin de ser almacenada y ligeramente tratada, y con la posibilidad de ser extraída y utilizada posteriormente.

Según su objetivo, la recarga artificial del acuífero suele dividirse en tres clases:

- **No intencional o accidental:** como sucede en el riego de cultivos, la deforestación y las fugas en tuberías de abastecimiento y drenaje.
- **No gestionada:** como pozos y tanques sépticos, dispuestos para disponer el agua por lo general contaminada y sin fines de reúso.
- **Gestionada:** es la que se realiza de manera intencional a través de mecanismos como pozos o lagunas, con el objetivo de reutilizar el recurso y/o reducir el impacto ambiental.

La recarga artificial de los acuíferos se ha dado (de manera accidental) desde tiempos muy remotos, con la inundación de cuencas para crear represas, o con el riego de cultivos como sucede en el Valle de Tula (Figura 11).

Por otro lado las fugas en el sistema de abastecimiento aportan también una recarga accidental significativa, pues si bien no todas tienen como destino el subsuelo, no podemos ignorar que en la Ciudad de México, así como en otras ciudades, el recurso nunca llega a los usuarios y se transmite de las tuberías al subsuelo.



Figura 11. Recarga accidental en el riego, Valle de Tula.

No obstante y en seguimiento de sus objetivos, el presente trabajo se enfocará en la recarga gestionada del acuífero.

III.1. OBJETIVOS DE GESTIONAR LA RECARGA DE LOS ACUÍFEROS

La recarga artificial del acuífero tiene entre otros propósitos, reducir, detener, o incluso revertir el abatimiento de los niveles freáticos, mejorar la calidad del agua en acuíferos contaminados, proteger el agua dulce de la intrusión del agua salada en las regiones costeras, detener el hundimiento del terreno provocado por la caída de los niveles freáticos y almacenar el agua superficial, incluyendo el agua tratada y de inundaciones para su posterior uso.

Entre las ventajas de almacenar agua de manera subterránea destacan a) un costo menor al costo del almacenamiento equivalente en la superficie, b) que el acuífero sirva como un distribuidor natural del recurso; reduciendo la necesidad de instalar tuberías o conductos, c) que el agua almacenada en el subsuelo esté protegida de la evaporación y contaminación, d) que durante su infiltración y una vez en el acuífero, se eliminen patógenos y contaminantes en el agua además de suavizar otras características cualitativas, e) se mitiguen los efectos de la intrusión marina⁶ en las zonas costeras, f) que se eviten los hundimientos diferenciales en las zonas urbanas, por la excesiva extracción del recurso, y que g) los sitios para almacenamientos superficiales puedan no estar disponibles o causar un gran impacto ambiental y/o social.

A excepción de la intrusión salina, en la ZMVM hay ocurrencia de todos los problemas que la recarga del acuífero mitiga.

III.2. FACTORES QUE AFECTAN LOS PROCESOS DE RECARGA

El tipo de Recarga Artificial de Acuíferos que se puede desarrollar en un sitio determinado depende de las condiciones geológicas e hidrológicas del mismo. Además del aspecto económico, éstos son algunos de los factores que deben tomarse en cuenta a la hora de elegir el proceso de recarga (Figura 12).

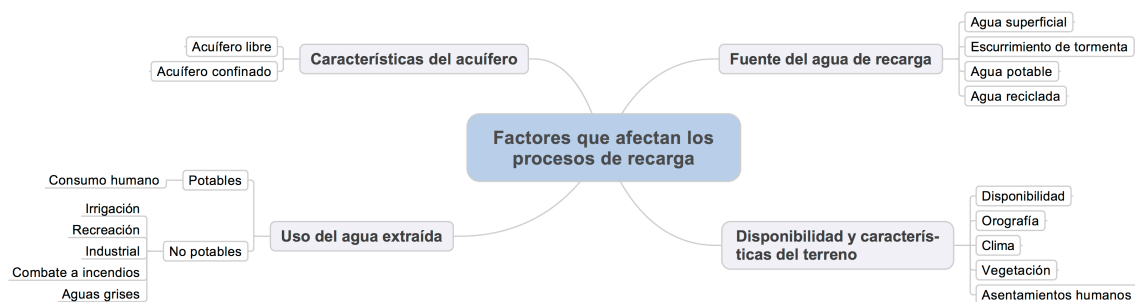


Figura 12. Factores que afectan los procesos de recarga.

⁶ Intrusión marina: es el movimiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, desplazando al agua dulce. Por tratarse de dos fluidos miscibles, no existe una interfaz brusca, sino que se pasa de un fluido a otro a través de una zona de mezcla, cuya anchura depende de la difusividad y dispersividad del medio y de las características del movimiento, (Llamas & Custodio, 1983).

III.2.1. FUENTE DEL AGUA DE RECARGA

Las fuentes de recarga pueden ser del tipo convencional⁷ o no convencional:, de ello dependen también las características físicas y químicas del agua de recarga. Se propone la siguiente clasificación:

Agua superficial. Incluye agua proveniente de arroyos, ríos o canales permanentes e intermitentes, lagos, lagunas y embalses artificiales.

Escurrecimiento de tormenta. Es el agua proveniente de la precipitación en zonas urbanas o rurales.

Agua potable. Agua de alta calidad usada para recargar el acuífero, confinado o de considerable profundidad, generalmente con el fin de ser un almacenamiento subterráneo del recurso.

Agua reciclada. Es el agua residual que se reutiliza con un tratamiento de por medio.

III.2.2. CARACTERÍSTICAS DEL ACUÍFERO

Existen en lo general dos grandes divisiones en los acuíferos, los **acuíferos libres y los confinados**. Un acuífero libre es el que se encuentra en contacto directo con la zona sub saturada del suelo, la presión del agua en la zona superior del acuífero es igual a la atmosférica. Por otro lado, en un acuífero confinado el agua se encuentra encerrada entre dos capas impermeables y existe una presión superior a la atmosférica (Figura 13). Para seleccionar un proceso de recarga, este es uno de los factores más importantes a tomar en cuenta.

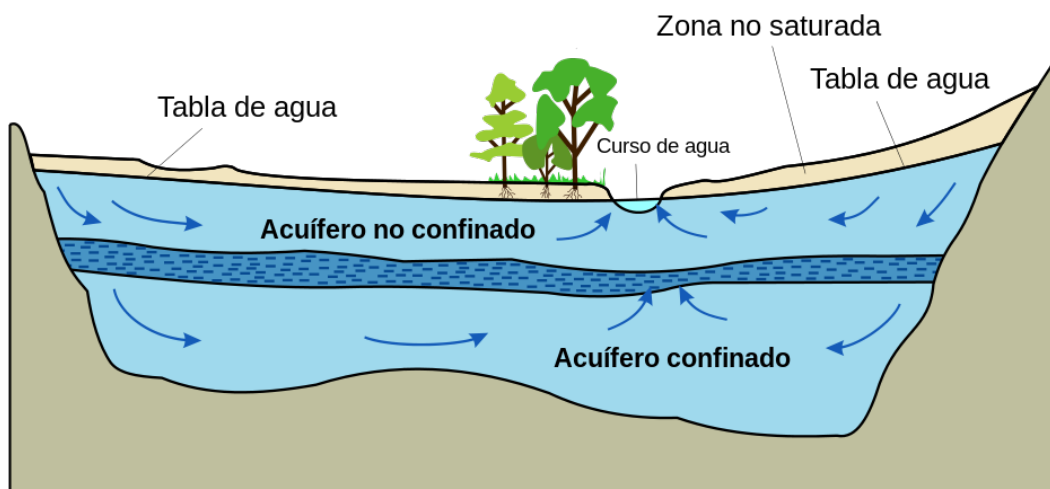


Figura 13. Diagrama de un acuífero confinado y uno no confinado o libre. Ilustración: Hans Hillewaert.

⁷ Fuente convencional: es aquella fuente hidráulica tradicional tal como los ríos, lagos, lagunas, pozos o alumbramientos naturales. En contraste, las fuentes no convencionales son las generadas por el hombre, como es el manantial originado como resultado de una aplicación excesiva de agua residual sin tratamiento en zonas de cultivo.

Además de lo mencionado, los acuíferos presentan una gran cantidad de parámetros químicos y físicos que los distinguen entre sí:

- A) Fronteras físicas e hidráulicas del acuífero (profundidad del Nivel de Aguas Freáticas (NAF), volumen de agua disponible) y el grado de confinamiento.
- B) Propiedades hidrogeológicas del acuífero y de las formaciones superiores (permeabilidad, conductividad hidráulica, capacidad de almacenamiento).
- C) Gradiente hidráulica del acuífero⁸.
- D) Profundidad al acuífero y a la superficie piezométrica⁹.
- E) Mineralogía del acuífero.
- F) Características físicas y químicas del agua en el acuífero.

Con la perspectiva de la recarga del acuífero, Gale (2005) propone cuatro grupos:

1. **Aluvión.** Por lo general se encuentran en las zonas bajas de las cuencas de ríos, presentan un relieve bajo y poco espacio libre de almacenamiento.
2. **Roca dura y fracturada.** Como su nombre lo indica se conforma por rocas ígneas o metamórficas fracturadas. Por lo general tienen una baja capacidad de almacenamiento y baja conductividad hidráulica. Se encuentran relativamente a gran profundidad.
3. **Acuíferos de arenisca consolidada.** Son porosos y/o fracturados, con gran capacidad de almacenamiento y conductividad hidráulica.
4. **Acuíferos de carbonato.** Semejantes a los de arenisca, no obstante, el grueso de su capacidad de almacenamiento se encuentra en las fracturas de la roca. Los acuíferos cársticos tienen un comportamiento extremo en términos de disipación del agua.

III.2.3. DISPONIBILIDAD Y CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO Y SU CONTEXTO REGIONAL

Son aspectos definidos por la posición geográfica en que se pretende llevar a cabo la gestión de la recarga del acuífero.

Orografía. Las características de la superficie del terreno pueden ser determinantes a la hora de realizar la recarga del acuífero, por ejemplo, un sistema de recarga por lagunas de dispersión difícilmente podrá realizarse en una zona montañosa o con una pendiente muy elevada.

Clima. El comportamiento climático de una región es clave a la hora de definir el método de recarga en un acuífero, un sistema por captación pluvial no podrá ser planteado en una región de baja precipitación media anual.

Vegetación. La presencia de vegetación altera el comportamiento del suelo con el agua.

⁸ Gradiente hidráulica: se define como la pérdida de energía experimentada por unidad de longitud recorrida por el agua.

⁹ Superficie piezométrica de un acuífero: la superficie piezométrica de un cuerpo subterráneo de agua se ubica en el punto en que la presión hidráulica es igual a la de la atmósfera.

Asentamientos humanos. La ubicación de un sitio de recarga respecto a centros urbanos es muy importante. Los sistemas se deben diseñar tomando en cuenta el alto nivel de extracción, contaminación y bajo nivel de recarga del agua (debido a la pavimentación). Así también, se debe tomar en cuenta la baja disponibilidad de terreno en el caso de plantearse un sistema superficial.

III.2.4. USO DEL AGUA EXTRAÍDA

Se trata de uno de los aspectos más importantes a la hora de plantear un sistema de recarga, implica factores como la cercanía del punto de extracción al sitio de disposición del agua y aún más importante, la calidad necesaria correspondiente al uso del líquido.

Los usos del agua extraída se dividen en: a) no potables.- irrigación, recreación, industrial, combate a incendios, aguas grises b) potables. El agua extraída de sistemas de tratamiento suelo-acuífero es por lo general apta para ser utilizada con fines recreativos, para el riego de áreas verdes entre otros usos no potables. **Su uso con fines potables requiere un tratamiento mayor.**

Tomando en cuenta estos factores se procedió a analizar el caso de estudio de la Ciudad de México.

III.3. FUENTES DEL AGUA DE RECARGA

Como se ha mencionado con anterioridad, la selección del proceso de recarga debe tomar en cuenta diversos factores para lograr ser tan económica, eficiente y eficaz como sea posible. Un factor determinante es el agua disponible.

III.3.1. AGUA SUPERFICIAL

El agua superficial puede ser una buena opción como fuente de recarga si las condiciones climáticas lo permiten.

En zonas donde existen ríos perennes, el agua suele desviarse hacia instalaciones de recarga, inclusive existen procesos que se enfocan en inyectar el agua directamente a través del lecho del río, aunque en estos casos el objetivo es mejorar la calidad del agua, más que el almacenamiento.

El agua de los ríos suele contener una gran cantidad de arcilla u otra clase de sólidos en suspensión; dependiendo de la velocidad y el caudal, un río puede contener de decenas a cientos de gramos por metro cúbico de sólidos en el agua. Estos sólidos provocan colmatación si el agua del río se utiliza directamente en la recarga, por lo tanto, un sistema de tratamiento debe considerarse antes de su inyección.

Por otro lado, el agua de estanques, balsas, lagos y lagunas no presenta un flujo considerable, es clara y prácticamente libre de sólidos en suspensión. Si el lago está libre

de contaminación por descargas domésticas, riego agrícola o crecimiento de algas, puede ser utilizado directamente como una fuente de agua en procesos superficiales de recarga.

III.3.2. ESCURRIMIENTO DE TORMENTA

En las áreas urbanas se genera una cantidad considerable de agua proveniente del escurrimiento por tormentas. Sin embargo, esta fuente sufre de ser poco predecible y muy variable, para obtener un abasto más constante se recomienda la instalación de estanques de retención e infiltración, áreas verdes y pavimentos porosos.

En zonas rurales, la recarga ocurre de manera natural a través de la superficie del suelo, no obstante, no se recomienda (como se hace en algunos sitios) conducir el agua hacia pozos de infiltración directa por los posibles contaminantes debido al uso de fertilizantes en las zonas cultivadas.

El agua proveniente del escurrimiento de tormentas tiene una calidad muy variable, suelen encontrarse desechos de construcción, aceite de automóvil, escurrimientos industriales, desechos animales, materia vegetal, químicos usados en jardines y basura en general.

La mejor calidad de agua debido a escurrimiento de tormenta se obtiene del agua acumulada en techos y azoteas; existen iniciativas para crear sistemas de recarga directa con agua obtenida de esta fuente. Esto no sólo reinyecta agua a los acuíferos urbanos por lo general sobre explotados, sino que el agua inyectada suele ser de mejor calidad que el agua contenida en estos acuíferos.

III.3.3. AGUA POTABLE

El uso de agua potable en la recarga de acuíferos se utiliza con mayor frecuencia en esquemas de Acuíferos de Almacenamiento y Recuperación (ASR por sus siglas en inglés). Los sistemas ASR son una alternativa útil cuando la demanda de agua se tiene cubierta y se tiene un sobrante, el acuífero hace las veces de almacenamiento subterráneo para cubrir la demanda en tiempo de estiaje.

III.3.4. AGUA RECICLADA

El agua reciclada como fuente para la recarga del acuífero presenta las ventajas de ser una fuente con un índice bastante uniforme de flujo y con una calidad uniforme, aunque inferior. El agua residual requiere un tratamiento antes de ser considerada como aceptable para la recarga del acuífero; los contaminantes presentes así como el tipo de tratamiento requerido depende de qué origen tenga el agua residual (doméstico o industrial) y de qué proceso de recarga se planeó utilizar (recarga directa o superficial).

Para su uso no potable; en el riego agrícola o urbano, para contrarrestar los efectos de la intrusión marina y los hundimientos en el suelo; el agua resultante de procesos de recarga artificial con agua tratada es generalmente aceptada, ello puede propiciar a que disminuya la demanda de agua potable en estos usos. Por otro lado, en su uso potable, los riesgos a la salud que implica la recarga artificial son mayores. Estudios usando métodos de última

generación han determinado que el agua producida usando tratamiento especial tiene una calidad equivalente a la de otras fuentes, sin embargo, existe incertidumbre en la identificación de compuestos tóxicos y potencialmente dañinos para la salud humana. Por lo anterior, la recarga artificial para uso potable debe utilizarse sólo en el caso de que no exista otra fuente potable disponible.

Dadas las condiciones del caso de estudio, el presente trabajo se enfocará en el uso de agua reciclada como fuente para la recarga.

III.4. PROCESOS DE RECARGA

Como todos los sitios de estudio en el mundo son únicos, existe una infinidad de métodos utilizados para llevar a cabo la recarga artificial del acuífero, en lo general estos procesos se agrupan en tres grandes categorías: procesos superficiales, subsuperficiales y subterráneos.

En general, los métodos que ofrecen más ventajas de operación e ingeniería son los superficiales de dispersión: tienen un bajo costo, son más sencillos de operar y diseñar, y en ellos se puede recargar agua de calidad media¹⁰, sin embargo, requieren de grandes extensiones de tierra, así como de suelos permeables, por tanto no son factibles en zonas donde el terreno necesario es caro o inexistente, además, los sistemas de recarga superficial solo pueden ser usados para recargar acuíferos no confinados o libres, pues el agua ingresa al subsuelo por gravedad.

Para llevar a cabo la recarga de acuíferos confinados se utilizan pozos subterráneos que penetren el estrato impermeable del subsuelo y lleguen hasta el acuífero, pero requieren de agua de una calidad superior para evitar problemas de obstrucción y contaminación del acuífero, pues el tratamiento que ofrece el sistema suelo-acuífero en este caso es prácticamente nulo (DINA-MAR, 2010).

La recarga a través de pozos de infiltración subsuperficial se utiliza para recargar acuíferos libres en el caso de que no existan las condiciones para desarrollar un sistema superficial de recarga (National Research Council, 1994).

Cuando en la recarga se utiliza agua de baja calidad, la estructura interna del suelo puede funcionar como un filtro natural de contaminantes físicos, químicos y biológicos. En ocasiones el motivo principal de llevar a cabo la recarga es el de dar un tratamiento adicional al agua, éstos sistemas son denominados de tratamiento suelo-acuífero (SAT, por sus siglas en inglés).

¹⁰ Debido a que la región vadosa del subsuelo es regularmente más impermeable y rugosa que el acuífero, el mejoramiento de la calidad del agua es mucho menor en el acuífero que en la región vadosa. Es por ello que en los procesos superficiales de recarga, es aceptable utilizar agua de calidad media mientras que, para llevar a cabo la recarga en pozos de infiltración directa, es necesario dar un tratamiento especial al agua hasta obtener la calidad deseada de reúso antes de inyectarla al acuífero.

Dicho lo anterior, para el estudio más detallado de los procesos de recarga, se ha seguido la clasificación utilizada por Gale (2005) y la DINA-MAR (2010). Tablas detallando las características, ventajas y desventajas de cada proceso se disponen en el apéndice 10.1.

Se pueden agrupar en seis los diferentes procesos de recarga artificial como se establece en la Figura 14:

- Sistemas superficiales o de dispersión.
- Modificación a canales.
- Filtración inducida en ríos.
- Sistemas profundos o pozos.
- Captación de lluvia.
- Drenaje sostenible (SUDS).

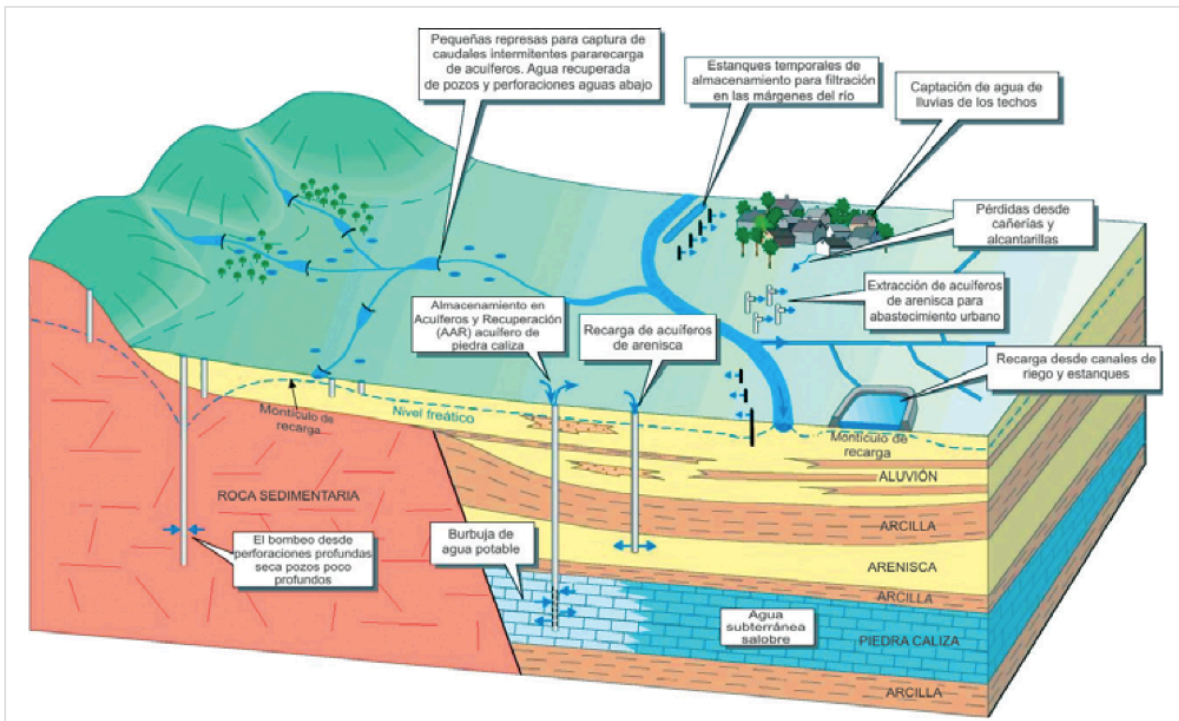


Figura 14. Esquema de los procesos de recarga superficiales, sub superficiales y subterráneos. Fuente: (DINA-MAR 2010).

III.4.1. SISTEMAS SUPERFICIALES O DE DISPERSIÓN.

Se lleva a cabo desde una superficie permeable a través de las capas no saturadas del suelo hasta el acuífero, para ello se utilizan obras como estanques, balsas de infiltración, humedales, canales, zanjas y retornos de riego.

Se caracterizan por ser las de costo más bajo, pero exigen una disponibilidad de terreno muy grande y, dependiendo de la profundidad del acuífero, su impacto puede ser lento.

Los dispositivos superficiales el agua son útiles únicamente para la recarga de acuíferos libres, pues el ingreso del agua sucede por infiltración a través del subsuelo.

La calidad del agua de recarga requerida en los procesos superficiales es también menor, debido al tratamiento que ofrece el subsuelo durante la infiltración.

Algunos dispositivos que funcionan bajo el principio de dispersión son:

- Cuencas y canales de Infiltración.
- Tratamiento suelo acuífero (SAT).
- Campos de infiltración controlada.
- Recarga incidental por retornos de riego.

Debido a la disponibilidad de espacio que demandan, estos dispositivos están muy limitados en su uso para el abastecimiento urbano, y por lo tanto difícilmente aplicables en nuestro caso de estudio.

III.4.2. MODIFICACIÓN A CANALES

Es una técnica que funciona de manera muy similar a los dispositivos de dispersión, pero a diferencia de éstos, se basan en lechos existentes y en los cuales sólo se quiere aumentar la tasa de infiltración. Además, mientras en los procesos de dispersión la zona saturada siempre actúa como sistema filtrante, en las modificaciones al lecho del río no siempre sucede así (Figura 15). Algunas técnicas comúnmente utilizadas son:

- Diques de retención.
- Diques permeables.
- Serpenteos.
- Escarcificación del lecho.
- Diques sub superficiales o en el lecho.
- Diques perforados.

Dado que se modifica el flujo natural de los ríos, como de las aguas subterráneas, es



Figura 15. Imagen de un caso de modificación al canal. Fuente: (DINA-MAR 2010).

necesario realizar un estudio de impacto ambiental, un estudio hidrológico y una correcta ejecución de la obra, pues una serie de factores como la precipitación media anual, el caudal del río, las características del suelo y el acuífero deben ser considerados para el correcto funcionamiento del dispositivo de recarga.

A diferencia de las técnicas de dispersión, no requieren de una gran superficie pero sí de una cuenca existente con las condiciones necesarias para desarrollar un conducto de este tipo, como resultado se obtiene también una probabilidad menor de eutrofización, pues el agua se mantiene en movimiento.

No obstante y dado que siguen teniendo un carácter superficial, las modificaciones a canales son útiles únicamente si se pretende recargar un acuífero libre.

III.4.3. FILTRACIÓN INDUCIDA EN RÍOS

Al igual que los sistemas de modificación a canales, son alteraciones que se realizan a un canal o río, pero a diferencia de los anteriores, en la filtración inducida no se modifica el cauce, es decir el trayecto del agua, consiste únicamente en hacer modificaciones en el lecho del río con el objetivo de aumentar la tasa de recarga. Engloba tres técnicas principales:

- Bancos filtrantes en lechos.
- Filtración interdunar.
- Riego subterráneo.

Es uno de los métodos más sencillos y baratos dado que se cuenta ya con la “infraestructura” necesaria. Al igual que las técnicas superficiales y las modificaciones a canales, estas técnicas son útiles sólo en el caso acuíferos superficiales.

III.4.4. CAPTACIÓN DE LLUVIA

Como su nombre lo indica son técnicas de recolección y aprovechamiento de la lluvia, para ello se acumula la precipitación en una gran área, sin embargo la utilización de este método requiere de una superficie impermeable y que además se conserve libre de contaminantes, condiciones difíciles de cumplir en un área urbana. Por otro lado, en la zona de estudio, la temporada de lluvias es muy corta e intensa (Conagua, 2010) lo que dificulta su eficiente captación.

III.4.5. DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS)

En la actualidad han surgido como fuentes de agua para recarga del acuífero los sistemas de drenaje sostenible dentro de los que tenemos:

- Recarga accidental, conducciones y alcantarillado.
- Sistemas urbanos de drenaje sostenible.

Su objetivo principal es separar y aprovechar al máximo el agua procedente de las lluvias en el sistema sanitario, esto se logra con sistemas de drenaje separado o mediante el uso de pavimentos permeables.

III.4.6. SISTEMAS PROFUNDOS O POZOS

Cuando se pretende recargar un acuífero confinado, los sistemas superficiales como los mencionados anteriormente no funcionan, en estos casos es necesario utilizar sistemas profundos de recarga, también llamados de recarga directa, pues su instalación consiste en perforar todas las capas superiores al acuífero e inyectar el agua directamente a éste.

Aunado a lo anterior, cuando el terreno disponible no es suficiente para instalar un dispositivo de recarga mediante dispersión o bien la topografía no lo permite, los sistemas de inyección profunda son una solución común.

Las técnicas más importantes de recarga profunda son:

- Pozos abiertos de infiltración.
- Pozos profundos y mini sondeos.
- Sondeos.
- Almacenamiento en el Acuífero y Recuperación (ASR por sus siglas en inglés).
- Almacenamiento en el Acuífero, Transporte y Recuperación (ASTR por sus siglas en inglés).

Entre las desventajas de los sistemas de recarga profunda está el elevado riesgo de contaminación al acuífero, estos sistemas exigen una calidad más elevada en el agua de recarga, pues ésta ocurre directamente a diferencia de la superficial, donde el agua atraviesa varias capas durante la infiltración.

Es por ello que previo a realizar la recarga, el agua debe tener al menos la calidad que presenta el agua en el acuífero, o bien la calidad necesaria en la extracción.

Por otro lado es también más costosa en su instalación, operación y mantenimiento, no obstante, en el caso de la Ciudad de México, debido principalmente a la falta de terreno libre, los procesos de inyección profunda son los más indicados para recargar el acuífero de la Zona Metropolitana del Valle de México.

IV. CALIDAD Y NORMATIVIDAD DEL AGUA PARA REINYECCIÓN

El agua de recarga debe cumplir con parámetros físicos, químicos, microbiológicos y radiológicos para asegurar que la calidad del recurso en el acuífero no se vea mermada y eliminar todo riesgo posible a la salud de los consumidores (CONAGUA, 2009).

Todos los sitios de estudio tienen características especiales que los diferencian entre sí; las exigencias en la calidad del agua de recarga cambian de un lugar a otro. En el presente trabajo se analizaron tres regulaciones, por tratarse de las más relevantes en el ámbito internacional (EE.UU. y EU) y por tratarse de países similares a México (Brasil): Environmental Protection Agency (Estados Unidos), el Conselho Nacional do Meio Ambiente (Brasil) y la Water Framework Directive (Unión Europea), y se contrastaron con la norma que regula la calidad de agua para recarga del acuífero en México: la Norma Oficial Mexicana 014-CONAGUA-2003.

IV.1. ESTADOS UNIDOS (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY)

En el caso de los Estados Unidos, el Programa de Control de Inyección Subterránea de la Agencia de Protección Ambiental (EPA UIC Program, por sus siglas en inglés) es el ente encargado de regular las actividades relacionadas con la recarga inducida a los acuíferos.

Su objetivo es establecer los requerimientos mínimos para los programas de Control de Inyección Subterránea. Para su legislación, la EPA clasifica los pozos en cinco categorías [40 CFR 144.6 (Environmental Protection Agency 2013)]:

- *Clase I.* Pozos usados por generadores de residuos peligrosos o radiactivos para inyectarlos por debajo del manto más profundo del acuífero, a un radio menor que un cuarto de milla de una fuente de agua potable subterránea.
- *Clase II.* Pozos que inyectan fluidos que tienen que ver con operaciones de almacenamiento y producción de gas natural o hidrocarburos de algún tipo.
- *Clase III.* Pozos que inyectan agua para la extracción de minerales.
- *Clase IV.* Pozos usados por generadores de residuos peligrosos o radioactivos para disponerlos en una formación que en un radio menor que un cuarto de milla contenga una fuente de agua potable subterránea.
- **Clase V. Pozos de inyección no incluidos en las Clases I, II, III, IV o VI.**
- *Clase VI.* Pozos usados para el secuestro geológico de CO₂.

Como se puede apreciar, la categoría que engloba a los pozos usados en la recarga de agua para su almacenamiento y recuperación es la Clase V.

A pesar de que algunos estados cuentan con su propia regulación en materia de recarga, éstas no supeditan la prohibición al flujo de cualquier contaminante en una Fuente

Subterránea de Agua Potable (USDW, por sus siglas en inglés). Las regulaciones de la Agencia de Protección Ambiental Estadounidense (EPA) dictan que “ningún dueño u operador debe construir, operar, mantener, conectar, abandonar, o conducir alguna actividad de inyección de manera que permita el movimiento de fluido conteniendo algún contaminante en una fuente subterránea de agua potable, si la presencia de ese contaminante puede causar una violación a la regulación para agua potable incluida en el Código de Regulaciones Federales (CFR) 40 parte 142 o si puede causar de otra manera afectaciones a la salud de las personas.” [40 CFR 144.12 (Environmental Protection Agency 2013)]

De acuerdo con lo mencionado, si se desea llevar a cabo un proyecto de gestión de recarga del acuífero, el agua a usarse debe cumplir con la norma de agua potable federal de los Estados Unidos [National Primary Drinking Water Regulations (Environmental Protection Agency U.S. 2009)].

IV.2. UNIÓN EUROPEA (WATER FRAMEWORK DIRECTIVE, WFD)

En los países que pertenecen a la Unión Europea, la Directiva Marco del Agua (Water Framework Directive por sus siglas en inglés) es el órgano que se encarga de dar las recomendaciones relacionadas con el manejo de los recursos hídricos, en lo particular y como parte de la WFD, la Directiva del Agua Subterránea (GWD, por sus siglas en inglés) determina los pasos para el logro de un buen estado cuantitativo y químico de las aguas subterráneas.

El objetivo general de la Directiva de Aguas Subterráneas es el de “Prevenir y controlar la contaminación de las Aguas Subterráneas para alcanzar niveles de calidad que no provoquen riesgos e impactos significativos a la salud humana y el medio ambiente” (Directiva Marco del Agua Unión Europea, 1998).

Una de las políticas principales es alcanzar un estándar aceptable en toda la Unión Europea aplicando métodos normalizados en todas las naciones que la conforman, reconociendo la diversidad en calidad y cantidad existente. La fecha límite para alcanzar un buen estándar en la UE es el año 2015.

Reconociendo la diversidad climática, geográfica, geológica, demográfica y en infraestructura a lo largo y ancho de la UE, la GWD no especifica los parámetros de calidad para Europa, *sólo limita un número de contaminantes cubiertos por otras directivas*; la GWD es la guía que orienta el funcionamiento de los sistemas de recarga.

Por otro lado, los cuerpos de agua subterránea destinados a producir agua potable en el futuro, deben ser capaces de producir agua potable cumpliendo los requerimientos de calidad correspondientes. Es por ello se tomaron los parámetros de la Directiva 98/83/CE, relativa a la calidad de las aguas destinadas a consumo humano que expide también la Unión Europea (Directiva Marco del Agua Unión Europea, 1998).

IV.3. BRASIL (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE)

En el ámbito brasileño, la dependencia encargada de regular las aguas subterráneas es el Consejo Nacional de Medio Ambiente del Ministerio de Medio Ambiente (CONAMA, por sus siglas en portugués), (Conselho Nacional Do Meio Ambiente).

La legislación brasileña clasifica los acuíferos en seis clases, indicando que los acuíferos a usarse como fuentes de agua potable deberán cumplir con los requisitos de calidad para consumo humano. Pero, en contraste con la clasificación estadounidense, la normatividad brasileña orienta su clasificación hacia el posterior reúso que tenga el agua recargada:

- *Clase Especial.* El agua de los acuíferos, conjunto de acuíferos o porción de éstos, destinados a la preservación de ecosistemas en unidades de conservación que contribuyan a cuerpos de agua superficiales clasificados como de clase especial.
- *Clase 1.* El agua de los acuíferos, conjunto de acuíferos o porción de éstos, sin alteración de su calidad por actividades antropogénicas y que no exigen tratamiento para cualquier uso preponderante debido a sus características hidrogeoquímicas naturales.
- *Clase 2.* El agua de los acuíferos, conjunto de acuíferos o porción de éstos, sin alteración de su calidad por actividades antropogénicas y que puede exigir tratamiento dependiendo de su uso preponderante, debido a sus características hidrogeoquímicas naturales.
- *Clase 3.* Agua de los acuíferos, conjunto de acuíferos o porción de éstos, con alteración de su calidad por actividades antropogénicas, para la cual no es necesario un tratamiento en función de esas alteraciones, pero que puede requerir un tratamiento dependiendo de su uso preponderante, debido a sus características hidrogeoquímicas naturales.
- *Clase 4.* Agua de los acuíferos, conjunto de acuíferos o porción de éstos, con alteración de su calidad por actividades antropogénicas, y que solamente pueden ser utilizadas sin tratamiento para usos menos restrictivos.
- *Clase 5.* Agua de los acuíferos, conjunto de acuíferos o porción de éstos, que pueda estar alterada de su calidad por actividades antropogénicas, destinadas a actividades que no tienen requisitos de calidad para su uso.

De acuerdo con esta clasificación, la legislación brasileña estipula que, “La recarga artificial para la contención de la intrusión salina, en acuíferos de las clases 1, 2 3 y 4, no podrán causar alteración alguna a la calidad del agua subterránea que provoque restricción en su uso” (Art. 23 Cap. IV R.C. 396; Conselho Nacional Do Meio Ambiente 2008).

Menciona además: “La inyección en acuíferos, con el objetivo de recuperarse, deberá tener los controles de los órganos correspondientes [...] no deberá alterar la condición de calidad de los acuíferos, excepto para su mejoría.”

Finalmente, respecto a la recarga directa: “Los acuíferos en que las aguas subterráneas sean de Clase 5, podrá ser admitida la inyección directa.

En conclusión, la norma brasileña indica que la calidad del agua de recarga debe ser tal que, en primer término, no afecte la calidad inicial en el acuífero y que tenga además la calidad necesaria de acuerdo al uso preponderante que se le vaya a dar en el reúso. Es por ello que para la comparación se han tomado los parámetros que el CONAMA indica en su uso para consumo humano.

IV.4. MÉXICO (CONAGUA)

Finalmente, en México, la Comisión Nacional del Agua de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales es el órgano encargado de administrar y preservar las aguas nacionales y sus bienes inherentes, para lograr su uso sustentable, con la corresponsabilidad de los tres órdenes de gobierno y la sociedad en general.

En lo que se refiere a la recarga de los acuíferos, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales expidió las Normas Oficiales Mexicanas NOM-015-CONAGUA-2007 y NOM-014-CONAGUA-2003. La primera regula las características y especificaciones de las obras y del agua para la infiltración artificial de agua a los acuíferos, mientras que la segunda determina los requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.

El capítulo 6.3 de la NOM-014-CONAGUA-2003 determina los requisitos en la calidad del agua de recarga. En el caso de que no existan captaciones para el suministro público-urbano o doméstico a 1.0 km de distancia o menos, los requisitos de calidad son los presentados en la Tabla 3.

Tabla 3. Calidad del agua residual tratada para recarga artificial si no existen captaciones a 1.0 km o menos de distancia al sitio de recarga. Fuente: (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2009).

Tipo de Contaminante	Tipos de Recarga	
	Superficial / Subsuperficial	Directo
Microorganismos Patógenos	Remoción o inactivación de microorganismos entero patógenos.	Remoción o inactivación total de microorganismos entero patógenos.
Contaminantes Regulados por Norma	Límites permisibles NOM-127-SSA1-1994.	Límites permisibles NOM-127-SSA1-1994.
Contaminantes No Regulados por Norma	DBO5 ≤ 30mg/l, COT = 16mg/l	COT ≤ 1mg/l

En el caso de que existan captaciones para el suministro público-urbano o doméstico a menos de 1.0 km de distancia, se requiere además cumplir con los siguientes puntos:

- Realizar un proyecto “piloto” de recarga *in situ*, cuya operación tenga la duración suficiente para determinar: la calidad del agua resultante de la mezcla del agua de recarga con el agua subterránea nativa, la interacción del agua de recarga con el subsuelo, la respuesta de los niveles de agua a la recarga y las variaciones de la tasa de infiltración en el tiempo;
- Efectuar un análisis hidrogeoquímico, basado en un modelo numérico, de las probables reacciones fisicoquímicas del agua de recarga con el agua subterránea nativa y con los materiales que conforman el acuífero y la zona no saturada. El análisis debe concluir: si el agua de recarga es compatible con el agua subterránea nativa o si existen condiciones para generar alguna reacción fisicoquímica que altere la calidad del agua nativa o las propiedades hidráulicas del acuífero;
- Aplicar un modelo numérico de flujo y transporte de solutos, para simular el impacto del sistema de recarga artificial en la calidad del agua nativa en las captaciones subterráneas y en los niveles del acuífero a recargar. La elaboración de este modelo deberá seguir el protocolo establecido por Anderson y Woessner;
- Cumplir con los límites máximos permisibles en la calidad del agua de recarga que determine “La Comisión”, para aquellos parámetros no regulados por la NOM-127-SSA1-1994, cuya presencia se suponga atendiendo al origen del agua residual tratada (Incluidos en el apéndice);
- Realizar, en su caso, los estudios toxicológicos que determine “La Comisión” en el agua de recarga, y
- Respetar las distancias mínimas y el tiempo de residencia que se especifican en la tabla 4.

En la Figura 16 se presenta el procedimiento de solicitud de construcción de un proyecto de recarga artificial (PRA), de acuerdo con la norma mexicana.

Tabla 4. Requisitos de distancia mínima a las captaciones y al tiempo de residencia en el subsuelo del agua de recarga. Fuente: (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2009).

Variable	Tipos de Recarga	
	Superficial / Subsuperficial	Directo
Distancia horizontal mínima entre el límite exterior del SRA y las captaciones para uso público-urbano o doméstico.	150 m	600 m
Tiempo de residencia del agua de recarga antes de su extracción.	6 meses	12 meses

En resumen, la calidad que debe cumplir todo proyecto de recarga artificial en México, debe cumplir con los parámetros incluidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, más los especificados en la NOM-014-CONAGUA-2003 en caso de encontrarse aprovechamientos a menos de un kilómetro.



Figura 16. Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada (NOM-014-CONAGUA-2003).

IV.5. RESUMEN

Las normas en materia de recarga inducida al acuífero, varían un poco de un país a otro en la forma de determinar los requerimientos de recarga, pero en el fondo todas coinciden en los siguientes aspectos:

- **Sitio de recarga.** La distancia que existe entre el sitio de recarga y los puntos de extracción de agua para su consumo debe ser tal que no se afecte la calidad del recurso extraído.
- **Método de recarga directa o superficial.** En el caso de tratarse de recarga directa, las legislaciones son mucho más exigentes que en el caso de recarga superficial, en donde se considera el efecto del suelo como filtro.
- **Origen del agua de recarga.** Si el agua es de una fuente natural o si es agua tratada determina el nivel de exigencia a la hora de analizar su calidad.
- **Uso del agua recargada.** Si el agua recargada tiene como fin detener la sobreexplotación para reducir el impacto ambiental, si se planea extraer para fines no potables, o bien si se planea su extracción para el consumo humano, es un factor crítico para definir la exigencia en la calidad del agua de recarga.

En el apéndice 10.2 se presenta la Tabla que concentra los parámetros indicados por las normas y criterios mencionados.

V. CASOS PRÁCTICOS DE REINYECCIÓN

Como se mencionó en párrafos anteriores, todos los casos de recarga son diferentes entre sí, no podemos más que agruparlos de acuerdo a algunas características comunes. Para ejemplificar lo antes dicho se describen a continuación un algunos proyectos de recarga importantes para este trabajo por su importancia histórica o bien su semejanza con el caso de estudio.

V.1. EL PASO, TEXAS: EL PRIMERO DE EE.UU.

El proyecto de recarga del acuífero del Paso, Texas (Figura 17), es el primer proyecto de inyección en Estados Unidos con el único objetivo de aumentar el almacenamiento de agua potable, usando aguas residuales tratadas (National Research Council 1994).

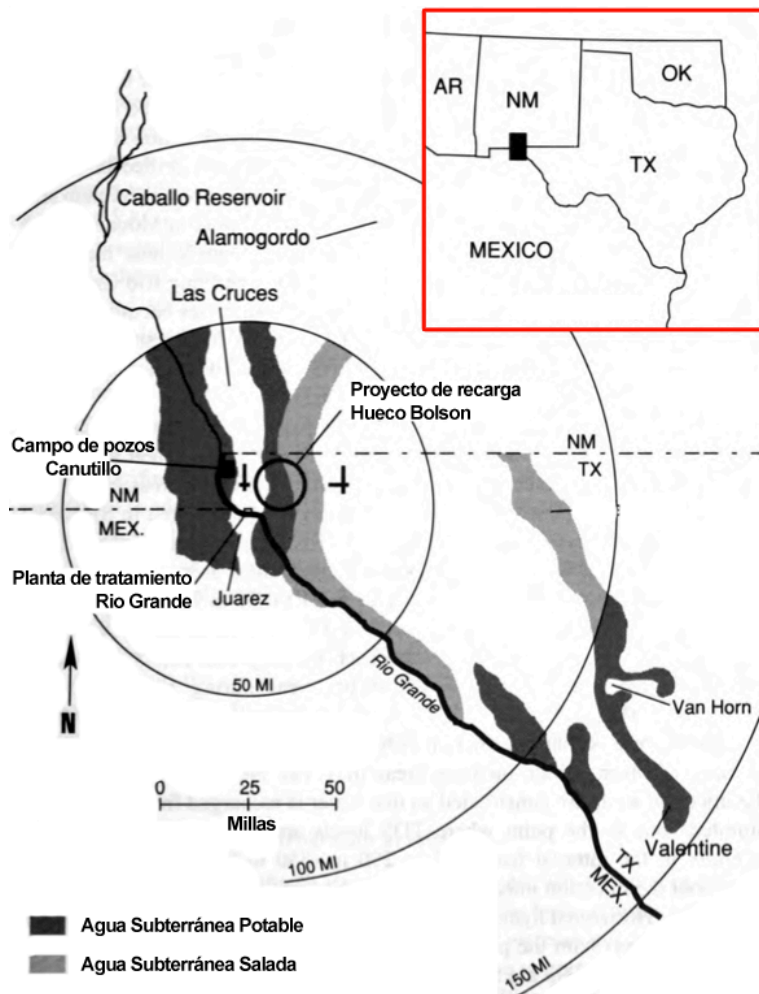


Figura 17. Proyecto de recarga de El Paso, Texas. Fuente: (National Research Council 1994).

La ciudad de El Paso, ubicada al oeste del estado de Texas, y en colindancia con la frontera mexicana sufre de un ambiente sumamente árido, su principal fuente de abastecimiento de agua potable (el 90%), proviene de la explotación del acuífero Hueco-Mesilla Bolsón, el cual también abastece a Ciudad Juárez; debido a estos dos grandes consumidores, la capa de agua potable disponible en el acuífero de El Paso se ha reducido significativamente dando lugar a la infiltración de agua salina que lo rodea.

La demanda total de agua de El Paso es de 100 MGD (millones de galones por día, cerca de 379 millones de litros diarios), de estos son tratados cerca del 50%, de tal manera que es posible reusar el recurso para recargar el acuífero Hueco-Mesilla Bolsón.

La planta de tratamiento Fred Hervey tiene una capacidad de 10 MGD (37.9 millones de litros a día) para recargar el acuífero. La planta consta de dos trenes de tratamiento de 5 MGD, que incluyen un sedimentador primario, un sistema de dos fases de carbón activado en polvo, tratamiento con cal, filtros de arena, desinfección con ozono, y carbono granular activado.

V.1.1. OPERACIÓN

El proyecto de recarga de El Paso es un sistema de inyección directa de 10 MGD (37.9 MLD), que fue elegido por encima de un proceso superficial de recarga, debido a la profundidad del nivel freático del agua (107 m por debajo de la superficie). El sistema consiste de una planta de tratamiento avanzado, una conducción a través del Hueco Bolsón y 10 pozos de inyección. El agua inyectada debe viajar 1.2 km a través del acuífero para ser extraída en los pozos de abastecimiento municipal, además una fracción del agua tratada está disponible directamente para su uso en la industria, así como para el riego de un campo de golf.

El objetivo del proyecto de recarga es incrementar la fuente de abastecimiento con el menor riesgo, los criterios básicos para lograrlo fueron: recuperación de la máxima cantidad de agua recargada para minimizar los costos y asegurar un tiempo de residencia suficiente para dar lugar a una filtración natural adicional; la separación de 1.2 km entre el sitio de recarga y los pozos de extracción dan al agua 6 años de residencia en el acuífero, más que suficiente para cumplir lo propuesto.

El agua recuperada es clorada antes de usarse, con ningún otro tratamiento. Después de casi 10 años de operación no se ha presentado ningún problema operacional.

V.1.2. FUENTE DEL AGUA RECARGADA

La planta de tratamiento Fred Harvey está diseñada para reciclar el agua usada por los residentes de la zona noreste de El Paso, las características del influente indican un agua residual preponderantemente doméstica y con una proporción mínima de agua residual industrial. Para evitar la presencia de componentes altamente tóxicos en el agua, se ha llevado a cabo una extensiva campaña pública así como un fortalecimiento en la regulación de las descargas industriales.

V.1.3. CANTIDAD

Los pozos inyectan 700 GPM (galones por minuto, alrededor de 2653 litros por minuto) y son bombeados periódicamente en sentido contrario para su limpieza. No han existido problemas de rendimiento.

V.1.4. CALIDAD

La calidad del agua producida por la planta de tratamiento avanzado Fred Hervey es monitoreada continuamente, sus parámetros son comparables a los encontrados en el acuífero y cumplen con la regulación estatal y federal de agua potable (Tabla 5).

Tabla 5. Calidad del agua en el acuífero Huevo Bolsón y el efluente de la PTAR Fred Hervey. (National Research Council 1994).

	Acuífero Huevo Bolsón [mg/l]	Efluente de la PTAR Hervey Plant [mg/l]
Bicarbonato	220	220
Cloruro	105	171
Fluoruro	1.09	0.9
Nitrato	7.1	1.6
Fosfato	0.03	3.07
Sílice	25	34
Sulfato	67	85
Bario	0.03	0.014
Calcio	51	61
Fierro	0.15	<0.1
Magnesio	14	4.42
Manganeso	0.05	<0.05
Potasio	4.8	15.5
Sodio	83	164
Dureza (carbonato de calcio)	184	167
pH	7.92	7.6
Sólidos disueltos totales	598	670
Turbiedad (NTU's)	0.44	0.14

V.1.5. CONCLUSIONES

El proyecto de recarga de El Paso es uno de los primeros en su tipo en ser desarrollados como parte de una estrategia de gestión de los recursos hídricos, como resultado la vida útil del acuífero Huevo Bolsón se ha extendido tangiblemente.

V.2. WINDHOEK, NAMIBIA: INTEGRACIÓN DE LA RECARGA ARTIFICIAL EN LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Windhoek es la capital y ciudad más grande de la República de Namibia, al sur de África, con una población de 230,000 habitantes y una demanda de 20 Mm³/a (millones de metros cúbicos por año) (South Africa's Artificial Recharge Information Centre 2007). La ciudad ha optado por un proyecto de recarga a gran escala antes de implementar otras opciones como conducir agua desde el norte del país. Esta decisión fue tomada basándose en el hecho de que la recarga artificial es la opción más barata y con mejor relación costo-efectividad para asegurar el abastecimiento de la Ciudad.

El riesgo de perder agua inyectada es casi inexistente, pues el acuífero está rodeado por formaciones geológicas con baja permeabilidad y la ciudad de Windhoek es el único usuario del acuífero. Para proceder con la realización de este proyecto, además de los estudios técnicos, se realizaron estudios financieros para conocer la opción económicamente más viable.

V.2.1. OPERACIÓN

El sistema utilizado de acuerdo con las características del subsuelo (el primero a nivel mundial en realizarse en un acuífero fracturado de cuarcita) fue el de recarga directa usando pozos de inyección. En 1996 se hicieron las primeras pruebas de inyección y a la fecha no ha habido problemas operativos; los resultados obtenidos del monitoreo han sido muy satisfactorios.

V.2.2. FUENTE DEL AGUA RECARGADA

El agua usada como fuente de recarga proviene principalmente de presas al norte de la ciudad, de manera que el sistema funciona por ser un sistema de almacenamiento libre de evaporación a diferencia de los almacenamientos superficiales.

V.2.3. CANTIDAD

La capacidad instalada del sistema de recarga es de 8 Mm³/a, equivalente al 40% de la cantidad extraída para consumo; una cifra importante considerando que esto se suma a la recarga natural que tenga el acuífero (Figura 18).

V.2.4. CALIDAD

El agua inyectada en el acuífero presenta una conductividad de 50 mS/m y un carbono orgánico disuelto de 4mg/L. Por su parte, a la salida la conductividad del agua es de 60 mS/m y presenta un carbono orgánico disuelto menor a 2 mg/L.

V.2.5. CONCLUSIONES

En resumen podemos decir que es importante realizar un análisis extensivo de las características hidrogeológicas del sitio de estudio y evitar así el riesgo de perder el agua inyectada y aprovechar la conducción subterránea del líquido. Por otro lado, es de la

misma importancia realizar un análisis financiero y probabilístico antes de ejecutar cualquier obra de gestión y determinar así la alternativa más efectiva en costos para asegurar el abastecimiento de una región.

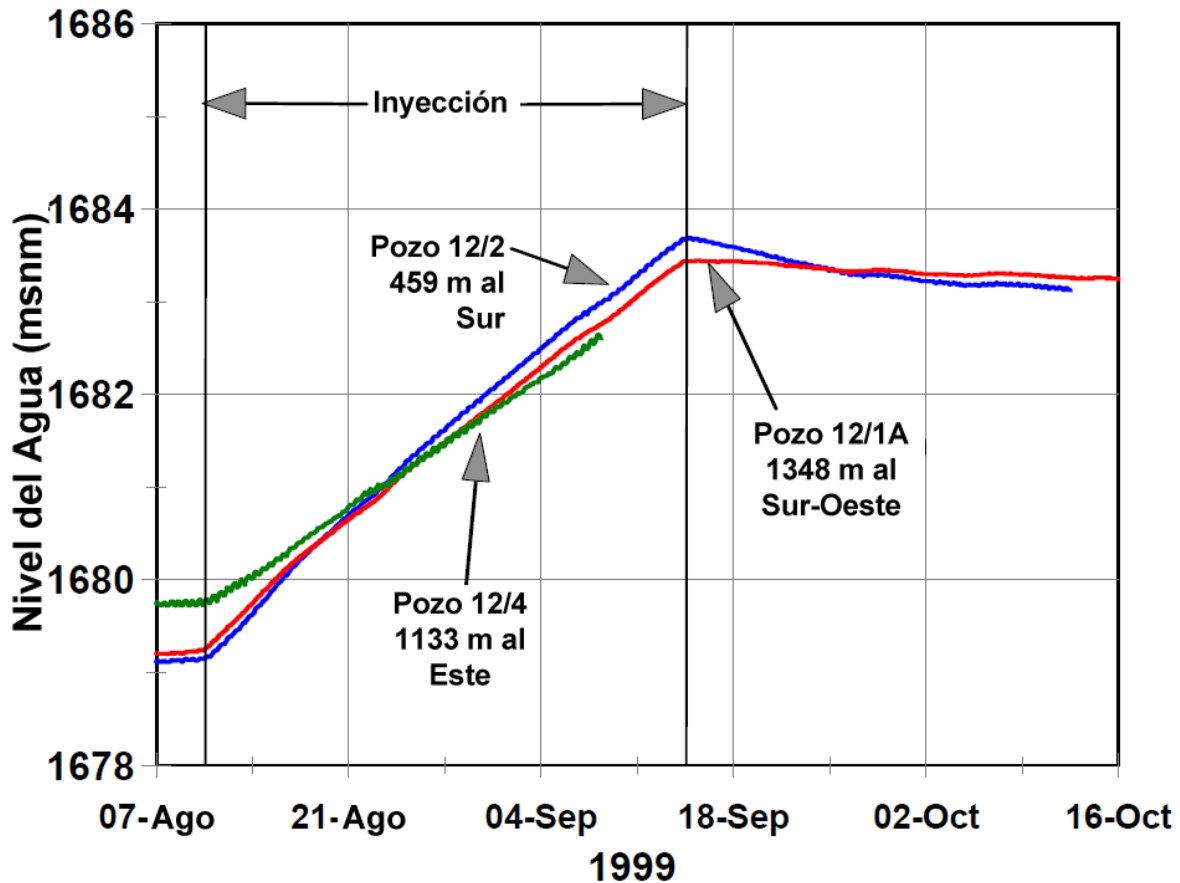


Figura 18. Niveles en los pozos de monitoreo alrededor del proyecto de inyección de Windhoek en Namibia. Fuente: (South Africa's Artificial Recharge Information Centre 2007).

V.3. ADELAIDA, AUSTRALIA: RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO CON AGUA TRATADA

Las actividades hortícolas de la región de Bolívar en el sur de Australia han utilizado agua subterránea para la irrigación (Figura 19). La expansión de estas actividades en el área requería de fuentes adicionales y la PTAR de Bolívar fue identificada como una buena alternativa. El uso de agua tratada para riego requiere según la legislación australiana, de tratamiento terciario. Desde 1999, el agua producida por este tratamiento es usada para irrigación, no obstante las plantas de tratamiento terciario no se dan abasto para satisfacer la demanda actualmente. Es por ello que almacenar el agua sobrante producida durante el invierno en un acuífero fue visto como una posibilidad factible para satisfacer la demanda durante el año, es por ello que se inició el proyecto de recarga, almacenamiento y recuperación de Bolívar, Australia.

V.3.1. OPERACIÓN

El sistema de recarga de Bolívar está ubicado 25 km al norte del centro de la ciudad de Adelaide (1.25 M hab.) en el sur de Australia. El agua de recarga es producto del tratamiento terciario del agua residual de las ciudades de Salisbury y Adelaide, se recarga directamente a través de un pozo a un rango de profundidad de 103-160m. El acuífero es confinado y está compuesto principalmente por calizas. Ya que el uso que se le da al agua recuperada es el de riego, el sistema no considera ningún tratamiento posterior a la recuperación.



Figura 19. Ubicación del sistema de recarga Bolívar. Fuente: (Page and Dillon 2010).

V.3.2. FUENTE DEL AGUA RECARGADA

El agua residual proveniente de las ciudades de Salisbury y Adelaide es bombeada a la PTAR Bolívar, ahí se le da un tratamiento primario (sedimentación) seguido por un proceso de lodos activados, el agua tratada es conducida luego a lagunas de estabilización donde permanece por 30 días. Finalmente se le da un tratamiento terciario (floculación, oxígeno disuelto y filtración), el efluente es clorado y almacenado en una

laguna previa al sistema de irrigación. A partir de ahí se bombea al sistema de riego y/o al sistema de recarga al acuífero.

V.3.3. CANTIDAD

La capacidad de acuerdo con los estudios de factibilidad se encuentra entre los 160 a 320 L/s.

V.3.4. CALIDAD

Se obtuvieron parámetros de calidad del agua de recarga, el agua contenida naturalmente en el acuífero y el agua recuperada del sistema de recarga Bolívar.

Tabla 6. Parámetros de calidad del agua de recarga, el agua en el acuífero y el agua recuperada en el sistema Bolívar de reinyección, Australia. Fuente: (Page and Dillon 2010).

Parámetro	Unidades	Agua de Recarga	En el Acuífero	Agua Recuperada
pH		7.1	7	7.8
Conductividad	µS/cm	1900	3700	2200
SDT	mg/L	1057	2009	1230
Redox	mV	662	65	56
Turbiedad	UNT	0.93	12	2.7
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	125	305	202
COT	mg/L	16	0.48	11
Aluminio	mg/L	0.11	0.028	ND
Boro	mg/L	0.29	0.1	0.31
Cadmio	mg/L	0.00058	<0.0002	<0.0002
Cobre	mg/L	0.011	<0.001	<0.001
Cromo	mg/L	0.0031	<0.003	ND
Fierro	mg/L	0.036	1.3	0.31
Fluoruros	mg/L	0.79	0.24	0.72
Nitratos	mg/L	8.6	0.0005	0.32
Plomo	mg/L	0.00058	<0.0005	<0.0005
Selenio	mg/L	0.0031	ND	ND
Sodio	mg/L	285	503	313
Sulfatos	mg/L	181	297	196
Zinc	mg/L	0.034	0.042	ND

El caso de recarga en la provincia de Adelaida en Australia es un buen ejemplo de un uso de la recarga artificial del acuífero como un mero sistema de almacenamiento, que a diferencia de los reservorios superficiales, está libre de fenómenos como la evaporación y la contaminación.

Cabe destacar el delicado proceso de tratamiento que se realiza sobre el agua a recargar, asegurando mantener e incluso mejorar la calidad del recurso presente en el acuífero.

V.4. SAN LUIS RÍO COLORADO, SONORA, MÉXICO: RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO MEDIANTE LAGUNAS DE INFILTRACIÓN CON AGUA RESIDUAL TRATADA

San Luis Río Colorado es una ciudad fronteriza al norte de México, ubicada en el estado de Sonora colindando con los estados de Baja California y Arizona, EE.UU., tiene un clima desértico y una población cercana a los 180,000 hab. (INEGI, 2010).

Con el fin de aumentar la cobertura del servicio de drenaje y dar tratamiento al agua residual que genera la población se construyó en el año 2000 una planta de tratamiento de tipo lagunar (tratamiento secundario) con capacidad de 375 litros por segundo, se localiza a 5.5 kilómetros al sur de la mancha urbana, sobre el desierto de Altar, dentro del distrito de riego 14 Río Colorado (Figura 20).



Figura 20. Ubicación de la PTAR y sitio de recarga. Fuente: (Hernández, 2009).

Dada la calidad que este sistema de tratamiento arroja -mínima permitida para la descarga a aguas y bienes nacionales, pero suficiente para el riego- se buscó sin éxito la comercialización del agua tratada para su uso en el riego o industrial.

Finalmente, con la divulgación del proyecto de norma NOM-014-CNA-2003, el Organismo Operador Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de San Luís Río Colorado (OOMAPAS) solicitó el apoyo de la Comisión Nacional del Agua, para llevar a cabo un proyecto de infiltración del agua residual.

Como se estudió en el capítulo anterior, la recarga artificial directa en México requiere que el agua a ser infiltrada cumpla con los límites mínimos permisibles de la norma para consumo humano, no obstante la misma norma indica que, en el caso de que se compruebe que el suelo ofrece un tratamiento suficiente para eliminar los contaminantes presentes en el agua, se puede desarrollar el proyecto.

De esta forma, los esfuerzos del OOMAPAS se enfocaron en realizar los estudios correspondientes, comenzado a inicios de 2004 con la realización de un proyecto piloto, así como la obtención de la hidrogeología de la zona del proyecto con niveles piezométricos y perfiles estratigráficos del acuífero, del que se obtuvo también la conductividad hidráulica, transmisividad, porosidad, coeficiente de almacenamiento y calidad.

Los resultados de las pruebas piloto fueron muy satisfactorias, con una eliminación significativa de contaminantes por el suelo y una conductividad hidráulica importante, aunque esta última se vio afectada por el fenómeno de colmatación (sedimentación de partículas sólidas del agua residual impidiendo la infiltración).

Con base en esta información se procedió a realizar el proyecto ejecutivo, el cual consistió en un arreglo de dos trenes de cuatro lagunas cuadradas de 120 metros por lado y un metro de profundidad, alimentadas por un canal central (Figura 21).

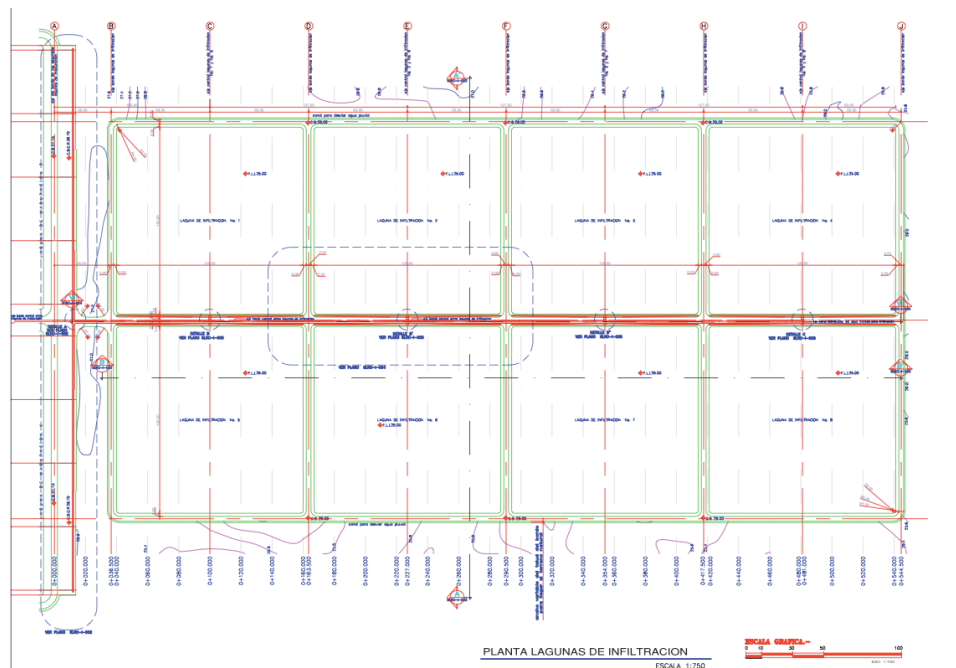


Figura 21. Arreglo de las lagunas de infiltración, San Luís Río Colorado. Fuente: (Hernández, 2009).

De esta manera se comenzó a infiltrar agua el 7 de agosto de 2007 con una recomendación del proyectista de no sobrepasar el tirante hidráulico de 40 cm para no acelerar el proceso de colmatación y un ritmo de inyección total de 29,800 m³/día.

Aunado a lo anterior, se tiene una estrategia de mantenimiento que consiste en la limpieza continua de la capa superficial de los fondos de las lagunas y la limpieza del canal alimentador.

Para verificar la calidad del agua infiltrada en el acuífero, se construyeron cuatro pozos de observación a 25 y 15 metros de profundidad, los resultados de laboratorio arrojaron valores muy aceptables en contraste con la NOM-127-SSA1-1994 (para consumo humano) (Figura 22).

Lab Sin
Servicios Profesionales S.A. de C.V.
Análisis Clínicos, Industriales Alimentos y Bebidas
Consultoría Ambiental, Seguridad, Higiene y Salud

Mexicali Baja California, Febrero 06 de 2008

AGUA DEL POZO L-5

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994

PARÁMETROS:	LÍMITES PERMISIBLES	RESULTADOS:
ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO:		
COLIFORMES TOTALES:	AUSENTES / NO DETECTABLE	28 NMP/100 ml.
COLIFORMES FECALES:	AUSENTES / NO DETECTABLE	< 3.0 NMP/100 ml.
ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO:		
COLOR:	20 U. ESC. PLA/COB	7 U.
OLOR Y SABOR:	AGRADABLE	
TURBIEDAD:	5 U.T.N.	47 U.
PH:	6.5-8.5 U.	7.70 U.
ALUMINIO:	0.20 mg/lit	0.003
ARSENICO:	0.05 mg/lit	NO DETECTABLE
BARIO:	0.70 mg/lit	0.70
CADMIO:	0.005 mg/lit	NO DETECTABLE
CIANUROS (como CN):	0.07 mg/lit	NO DETECTABLE
CLORO RESIDUAL LIBRE:	0.2 - 1.50 mg/lit	< 0.1
CLORUROS:	250.00 mg/lit	438
COBRE:	2.00 mg/lit	NO DETECTABLE
CROMO TOTAL:	0.05 mg/lit	NO DETECTABLE
DUREZA TOTAL: (como CaCO ₃):	500.00 mg/lit	270
FENOLES o compuestos fenólicos:	0.3 mg/lit	0.001
FLUORUROS (como F):	1.50 mg/lit	0.64
FIERRO:	0.30 mg/lit	0.01
MANGANESO:	0.15 mg/lit	0.03
MERCURIO:	0.001 mg/lit	NO DETECTABLE
NITRATOS: (como N):	10.00 mg/lit	0.24
NITRITOS: (como N):	1.00 mg/lit	0.002
NITROGENO AMONIACAL: (como N):	0.50 mg/lit	0.211
PLOMO:	0.01 mg/lit	NO DETECTABLE
SODIO:	200.00 mg/lit	149
SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES:	1,000 mg/lit	1,035
SULFATOS: (como SO ₄):	400.00 mg/lit	161
SUST. ACT. AL. AZUL DE METILENO:	0.50 mg/lit	0.16
TRihalometanos TOTALES:	0.20 mg/lit	0.005
YODO RESIDUAL LIBRE:	0.2-0.5 mg/lit	NO DETECTABLE
ZINC:	5.00 mg/lit	0.11

LÍMITE DE DETECCIÓN (mg/lit): Al: 0.001 As: 0.010 Ba: 0.100 Cd: 0.001 Cr: 0.001 Cu: 0.020 Cs: 0.001 Fe: 0.100 HENOCES: 0.001 F: 0.010 Mn: 0.010 Hg: 0.001 Pb: 0.001 Ni: 0.001 Zn: 0.010 TRIT: 0.30

ATENTAMENTE
Q.F.B. Raúl Torres Arroyo
Quim. Responsable

2-2

ay 798-11, Fracc. Sonora, Mexicali, B.C. Tels y Fax: 565-2492, 565-2240 y 565-2104 Horario de 8:

Figura 22. Resultados del análisis de calidad. Fuente: (Hernández, 2009).

V.5. IZTAPALAPA, CIUDAD DE MÉXICO: RECARGA ARTIFICIAL DIRECTA USANDO AGUA RESIDUAL TRATADA

El Sistema de Aguas de la Ciudad de México opera una de las plantas de tratamiento de aguas residuales más grandes del País, y la más grande de la Región Hidrológico Administrativa Aguas del Valle de México (CONAGUA, 2009).

Se trata de la PTAR Cerro de la Estrella, ubicada en la Delegación Iztapalapa de la Ciudad de México (Figura 23). Su capacidad instalada de tratamiento es de 4,000 lps mediante un proceso de lodos activados, no obstante, debido a obstáculos en la conducción del agua, opera a una ritmo de 2,100 lps. Entre los usos que tiene el agua tratada, están principalmente el riego agrícola en la zona chinampera de Xochimilco y Tláhuac, el riego a áreas verdes y la venta al sector industrial.



Figura 23. Ubicación de la PTAR Cerro de la Estrella en la Delegación Iztapalapa del Distrito Federal.

V.5.1. OPERACIÓN

Aunado a lo anterior, se cuenta con un módulo de tratamiento avanzado, el cual toma el efluente de la planta de lodos activados y pasa por un proceso de floculación, filtración y ozonación, posteriormente se utiliza una resina para adsorción de sales y ablandamiento del agua, finalmente se pasa por un proceso de membranas de ósmosis inversa y uno de luz ultravioleta para así disponerse al pozo de recarga (Figura 24).

El proyecto ya se ha ejecutado, no obstante se encuentra en etapa de piloto y quedan por ver aún los resultados que arroje, tanto en calidad obtenida como en volumen efectivamente recargado. Los resultados que se obtengan del análisis del funcionamiento de este piloto, serán de gran importancia, pues es el primer dispositivo de su tipo en la Ciudad de México.

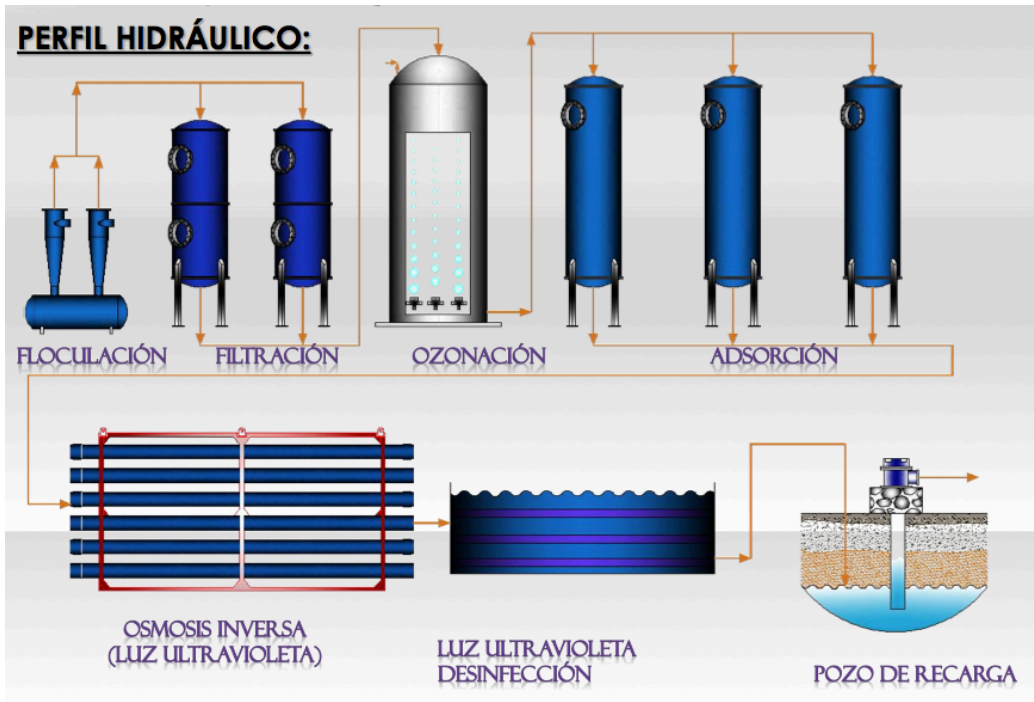


Figura 24. Diagrama del tratamiento avanzado en el piloto de recarga de la PTAR Cerro de la Estrella. Fuente: (SACM, 2011).



Figura 25. Tren de tratamiento avanzado y su módulo de ósmosis inversa. Fuente (SACM, 2011).

VI. PROPUESTA DE UN DISPOSITIVO DE RECARGA

Como se mencionó con anterioridad, uno de los propósitos del presente trabajo es estudiar la posibilidad de establecer un dispositivo de recarga en la ZMVM. Para lograrlo se evaluó la información disponible de los factores que definen la construcción de un sistema de recarga.

VI.1. OBJETIVO DE LA RECARGA DEL ACUÍFERO

En el caso del Valle de México el objetivo principal de crear un sistema de recarga es muy claro: asegurar las fuentes de abastecimiento de agua para el consumo humano.

Algunos objetivos secundarios son reducir la necesidad de importar agua de otras cuencas, mitigar el hundimiento del terreno causado por la excesiva extracción de agua del subsuelo y mejorar la calidad de los cuerpos de agua subterráneos.

VI.2. ACUÍFERO A RECARGAR

El acuífero 0901 Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se considera el más indicado a recargar, pues es el más desfavorable en cuanto a su grado de explotación (Tabla 7) (Comisión Nacional del Agua, 2009).

Tabla 7. Balance y disponibilidad en el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Unidades en hectómetros cúbicos anuales. Fuente: (Comisión Nacional del Agua 2009).

Recarga	Descarga natural	Volumen concesionado	Disponibilidad	Grado de explotación
279	0	1,248.58	-969.58	448%

Dado que se tiene concesionado un volumen de casi 1,250 hm³ anuales (38.9 m³/s) y se recargan sólo 279 hm³ el acuífero de la ZMCM tiene un grado de explotación del 448%, es decir, se extrae casi 5 veces más agua de la que se recarga.

El acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México se encuentra ubicado en el sur poniente de la Cuenca del Valle de México, ocupa el 17% de la superficie de la cuenca endorreica¹¹. La Ciudad de México y su área conurbada dependen fundamentalmente para abastecimiento de agua potable del suministro del acuífero.

Según la información publicada en el análisis del estrato subterráneo de la Comisión Nacional del Agua (Comisión Nacional del Agua, 2009), la Ciudad y el acuífero están separados, en su mayor parte por un acuitardo arcilloso, el espesor del acuitardo es de

¹¹ Cuenca endorreica: es un área en la que el agua no tiene salida fluvial y en la que las corrientes de agua se acumulan en lagos o lagunas, a diferencia de una cuenca exorreica en la que el agua sí tiene salida.

alrededor de 50 metros, el acuífero alcanza profundidades mayores a 800 metros; y en él se encuentran pozos con profundidades que oscilan entre 100 y 400 m.

Debido a que el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México presenta de manera irregular material arcilloso que le sirve como confinante o semiconfinante; el acuífero se clasifica como semiconfinado. El contenedor impermeable del acuífero está constituido por rocas volcánicas y calizas, en tanto que el paquete sedimentario da origen a un sistema acuífero complejo formado por tres grandes cuerpos: en la parte superior, un paquete arcilloso de alta porosidad, baja permeabilidad y gran heterogeneidad en su constitución, que forma un acuitardo de espesor variable y que actúa como semiconfinante en el centro de la cuenca.

Bajo este estrato sedimentario se encuentra el acuífero actualmente en explotación, formado por material granular más grueso que el del acuitardo, esto es, piroclastos y conglomerados de origen volcánico. Su espesor es variable (generalmente mayor de 200 m) así como sus propiedades hidráulicas. Le subyacen rocas volcánicas fracturadas, cuya base llega a estar a los 2000 m en el centro disminuyendo hacia las márgenes de la Cuenca. Este acuífero es recargado por infiltraciones de la precipitación, actuando como áreas de recargas más importantes las sierras circundantes (Comisión Nacional del Agua, 2009).

VI.2.1. EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS

Según información de la CONAGUA, en el periodo de 1987 a 1997 se detectaron valores de evolución negativa de hasta 15 metros en la parte sur del acuífero, que comprende las estribaciones de la Sierra Chichinautzin, lo que indica que el descenso de los niveles varía de 1 a 1.5 metros en un lapso de 10 años; en la parte central de la Ciudad de México la evolución varía de -5 a -12 metros por lo que se puede apreciar que los valores de evolución negativa dan un promedio de descenso de los niveles de 0.5 a 1.2 m anuales, en la porción poniente de la Ciudad de México; en las estribaciones de las Sierras de Monte Alto y Las Cruces, en este periodo se tiene una evolución positiva que fluctúa entre 5 y 10 metros, lo que significa que los niveles ascendieron en dicha zona con un promedio de 0.5 a 1 metros anuales. Los datos anteriores fueron obtenidos del Plano de Evoluciones del periodo 1987-1997.

VI.2.2. CALIDAD DEL AGUA EN EL ACUÍFERO

En cuanto a calidad, es sabido que la caracterización del agua en el acuífero de la ZMCM rebasa las concentraciones establecidas por la norma de consumo humano (EFE Asesores, 1995), el contenido de cloruros para el año 1995 en la Ciudad de México excedía ya las concentraciones en 250% más del límite permisible; la evolución de los cloruros en el periodo 1987-1995 en la parte noreste en el Municipio de Ecatepec fue muy significativa, con incrementos de hasta 400 mg/L. Por su parte, la dureza se incrementó en 200 mg/L.

Al norte del Distrito Federal colindando con la parte sureste del Lago de Texcoco se rebasan los límites referentes a calidad del agua subterránea en los contenidos de

amonio, lo que indica que existe contaminación de las aguas, posiblemente debido al drenaje de la ciudad, así como posible infiltración de aguas residuales provenientes de asentamientos humanos irregulares.

VI.3. DISPOSITIVO DE RECARGA

Por lo antes mencionado, se concluye que, el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, dadas sus condiciones geológicas, hidrológicas y químicas, su ubicación y la falta de superficie libre para llevar a cabo otro tipo de recarga, debe ser recargado mediante un proceso directo de recarga, es decir mediante pozos de inyección.

La instalación de un sistema de recarga directa permitiría alargar la vida del acuífero de la ZMCM y, en el mejor de los casos, lograr la sustentabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua de la Ciudad de México; mejorar la calidad del agua presente en el acuífero y contrarrestar los hundimientos del terreno debidos a la extracción indiscriminada del agua subterránea.

En cuanto a la ubicación del dispositivo de recarga, se propone la zona de Tlalnepantla al noroeste de la ciudad, donde existen ya baterías de pozos para extracción. Lo anterior cuidando por supuesto las distancias mínimas entre el pozo de recarga y los sitios de extracción, que según la NOM-014-CONAGUA-2003 debe ser de al menos 600 m en horizontal, y cumplir un tiempo de residencia (entre la recarga y la extracción) de al menos 12 meses. Para cumplir con lo anterior, se deben realizar los estudios geohidrológicos correspondientes.

VI.4. FUENTE DEL AGUA DE RECARGA

El Valle de Tula es la principal planicie del Valle del Mezquital, abarca casi la totalidad del Distrito 03 de riego. Inicia en la ciudad de Tula (2030 m.s.n.m.) y desciende hasta el poblado de Mixquiahuala (1999 m.s.n.m.), es limitado al norte por la sierra de San Miguel de la Cal, al oeste por la sierra de Xinthé, al este por la sierra de Pachuca, al sureste por la sierra de Chicvasco y al sur por lomeríos de Tepeji del Río y por la sierra de Ajacuba. Presenta una inclinación predominante hacia el río Tula.

VI.4.1. VOLUMEN

Existen tres tipos de acuíferos en la zona del Valle del Mezquital: el aluvión, los derrames de lava del Cuaternario y las calizas del Cretácico Superior.

Los derrames de lava son los acuíferos más importantes en área y son la principal fuente de agua subterránea (Comisión Nacional del Agua, 2009), presentan una permeabilidad de media a alta, esto debido al fracturamiento de la roca. En los sitios donde afloran, forman acuíferos de tipo libre, mientras que a profundidad se encuentran semiconfinados.

Las profundidades del nivel estático de agua en el Valle del Mezquital varían de los 10 a los 55 m por debajo de la superficie, incluso en la zona de Mangas – Tlahuelilpan los niveles están a pocos metros o son brotantes, debido a que en esta región la recarga por irrigación es muy alta, ello ha provocado la saturación del medio y el brote de manantiales.

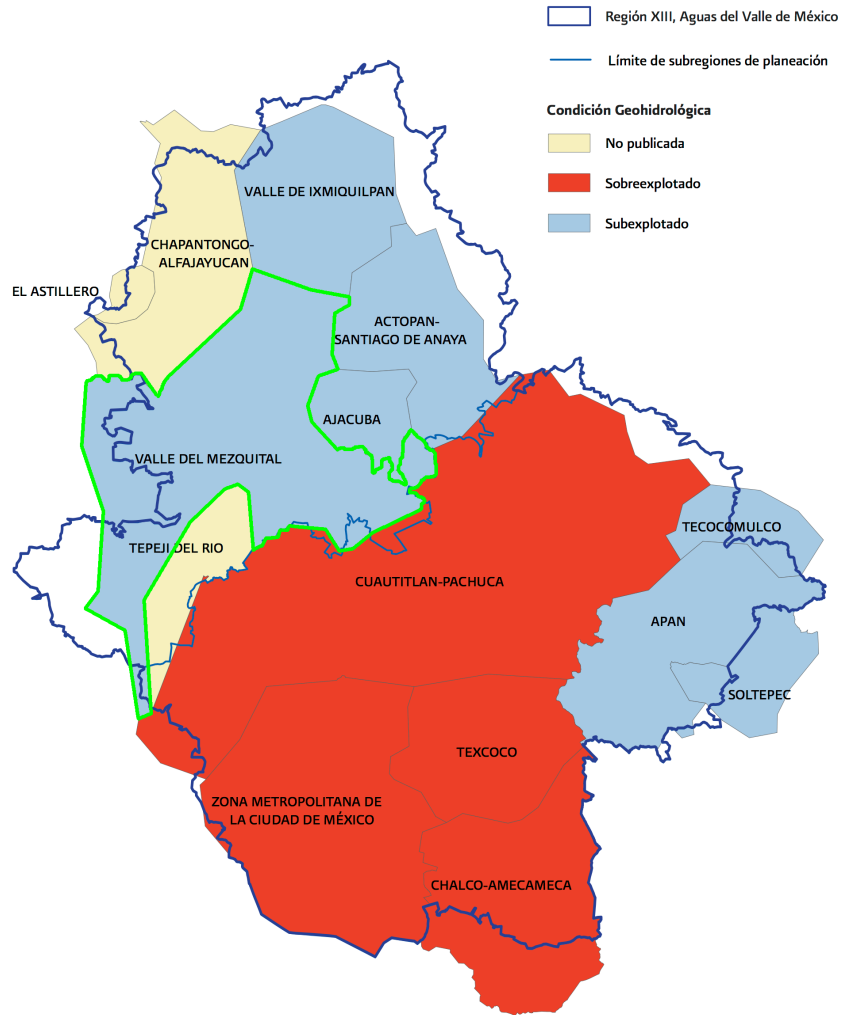


Figura 26. Mapa de la RHA XIII Aguas del Valle de México donde se resalta la ubicación de los acuíferos Valle del Mezquital y de la ZMVM. Fuente: (Comisión Nacional del Agua 2009).

VI.4.1.2. APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

Los aprovechamientos por uso del agua son los mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8. Aprovechamientos de agua subterránea en el Valle de Tula. Fuente: (Comisión Nacional del Agua, 2009).

Uso	Volumen [Mm ³ /año]	Porcentaje (%)
Abrevadero	0.1	0.1
Agrícola	4	4.3
Avícola	0.4	0.4
Doméstico	18.5	20.1
Recreativo	16.6	17.9
Industria	53	57.2
	92.6	100

La extracción total del agua subterránea en el Valle de Tula es de 92.6 hm³ al año, lo cual es destinado principalmente a la industria, el abastecimiento de agua potable y la recreación. El aprovechamiento de agua subterránea para la agricultura es de sólo 4 hm³ al año, lo que representa sólo el 2.5% del agua destinada a esta actividad, el 97.5% restante proviene del aporte de agua residual proveniente de la ZMVM, lo que suma un total de 160 hm³.

VI.4.1.3. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y las salidas (descarga), representa el volumen ganado o perdido anualmente por el almacenamiento no renovable en el subsuelo.

Recarga

La recarga del acuífero proviene principalmente de la infiltración en los canales de riego y del exceso de agua de irrigación en los campos de cultivo. El agua de lluvia también contribuye a la recarga, sin embargo, su aporte está limitado por la baja precipitación y la alta evaporación.

La recarga natural considerada como la infiltración del agua de lluvia más el flujo subterráneo se ha calculado en 132.5 hm³ al año; 67.5 hm³ debido a la infiltración de la precipitación y 65 hm³ resultado de la recarga horizontal por flujo subterráneo.

El monto total de la recarga inducida es de 540.2 hm³ al año, resultado de las fugas en la red de canales de riego, las infiltraciones por sobre riego directamente en las parcelas, ya sea por riego mediante pozos como por las aguas residuales.

En total se tiene una recarga media anual de 672.7 hm³ al año (21.3 m³/s).

Descarga

Las salidas del acuífero están compuestas por la descarga natural, existente antes de que fueran modificadas por la saturación del acuífero, la descarga inducida tanto por extracción de pozos como por niveles freáticos someros.

En total, la descarga media anual del acuífero del Valle del Mezquital es equivalente a la recarga, lo que lo convierte en un acuífero en equilibrio dinámico, esto indica que ya alcanzó su capacidad máxima de almacenamiento y el volumen que entra es igual al volumen que sale. No obstante, para fines administrativos se obtuvo la descarga natural comprometida, con base en los volúmenes captados para diferentes usos en los manantiales, el flujo subterráneo que constituye un aporte importante hacia otros acuíferos, y una parte importante del flujo base y del drenaje hacia el río Tula se calculó en 500 hm³/año (15.9 m³/s).

A esto se suma el volumen concesionado e inscrito en el REPDA que consiste en 157.4 hm³/año (5 m³/s).

La disponibilidad entonces se calcula con la ecuación:

$$\text{Disponibilidad} = \text{Recarga Total} - \text{Descarga natural} - \text{Volumen concesionado}$$

Sustituyendo valores:

$$15'315,811 = 672'700,000 - 500'000,000 - 157',384,189$$

El cálculo indica que existe un volumen disponible medio anual de 15.3 hm³ (0.5 m³/s), no obstante, dado que la recarga recibida por el riego es igual a su descarga, podría extraerse un volumen adicional de agua, igual al que recibe el flujo base sin afectar su equilibrio. Los principales efectos serían la desaparición de ese flujo y un abatimiento regional de los niveles piezométricos del orden de los incrementos, resultado de la recarga por el riego.

Según un estudio realizado para la Comisión Nacional del Agua (Fuentes, et al., 1999) podría extraerse del acuífero, un volumen anual de 355 hm³/año (aproximadamente 11.3 m³/s), mas recomienda actuar con cautela en la explotación de la fuente ya que el cambio en sus condiciones geohidrológicas sería muy grande y puede tener consecuencias secundarias no previstas.

Si la explotación se incrementa en forma gradual será posible ir analizando y conociendo mejor las respuestas del acuífero y planear con más seguridad su aprovechamiento futuro.

VI.4.2. CALIDAD

El agua infiltrada al subsuelo ha provocado una contaminación perceptible del acuífero del Valle del Mezquital, la presencia de contaminantes orgánicos además de los

microbiológicos, físicos y químicos confirman que el agua contenida en el acuífero del Valle del Mezquital tiene como origen la Ciudad de México (Jiménez, et al., 2006).

Debido a que es éste uno de los casos más grandes de recarga incidental con aguas residuales a nivel mundial, diversos estudios se han realizado en materia de calidad del agua contenida en los acuíferos del Valle de Tula, uno de los más completos realizado por el Grupo Tratamiento y Reúso del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Jiménez, et al. 2006) hace un estudio histórico bibliográfico de caracterizaciones del agua en los pozos, norias y manantiales del Valle de Tula, y con base en ello realiza pruebas en los sitios de mayor interés en torno a los parámetros críticos según la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección al Medioambiente de Estados Unidos (EPA).

Tabla 9. Parámetros y número de manantiales que exceden el valor establecido en la Normatividad Mexicana.
Fuente: (Jiménez, et al., 2006).

Parámetro	Concentración máxima permitida (NOM-SSA-127/94) [mg/l]	Promedio medido en los manantiales [mg/l]		Número de manantiales que presentan concentraciones arriba de la máxima aceptable de acuerdo con la modificación a la NOM-SSA1-127/96	
		Media	Intervalo		
Aluminio	0.2	6.7	2.3 - 18	6/6	100%
Cromo	0.05	3.1	0.9 - 13.2	10/10	100%
Plomo	0.01	1.1	0.2 - 5.7	9/9	100%
Cadmio	0.005	0.1	0 - 0.2	8/8	100%
Cobre	2	5.9	1.3 - 14.5	8/10	80%
Coliformes fecales [UFC/100ml]	0	903	0 - 7600	6/10	60%
Zinc	5	11	1.8 - 61.8	2/4	50%
Sodio	200	204	81 - 418	4/10	40%
Sulfatos	300	316	31 - 1860	3/10	30%
Nitratos	10	7.8	0.1 - 17.8	2/10	20%
Fluoruros	1.5	2.8	0 - 32.9	3/10	30%
Bario	0.7	0.1	0.1 - 0.1	0/5	0%
Fierro	0.3	0.1	0 - 0.2	0/4	0%
SAAM	0.5	0.1	0 - 0.1	0/4	0%
Yodo	0.5	0.1	0.1 - 0.1	0/2	0%
Nitritos	1	0.001	0.001	0/8	0%

De los valores históricos se obtuvo que la calidad en los cuerpos de agua más vulnerables (manantiales) sobrepasó en el 100% de los casos los valores establecidos por la norma para el aluminio, el cadmio, el cromo, el plomo y el zinc. Otros parámetros que también excedieron el valor de norma pero sólo en algunos manantiales fueron: cobre, coliformes fecales, fluoruros, sodio, sulfatos y nitratos. Parámetros como, fierro, bario, SAAM, yodo y nitritos, no excedieron la norma en ningún manantial (Tabla 9).

Estudios más recientes realizados por el Instituto de Ingeniería (Instituto de Ingeniería UNAM 2013) utilizaron procesos de tratamiento avanzado con membranas de nanofiltración. Por haber resultado los cuerpos de agua más vulnerables según estudios

históricos (Jiménez, et al. 2006), eligieron el agua del manantial Cerro Colorado, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Concentración de contaminantes emergentes antes y después del tratamiento con un módulo de nanomembranas con agua del manantial Cerro Colorado. Fuente: (Instituto de Ingeniería UNAM 2013).

Compuesto	Entrada [ng/L]	Permeado [ng/L]	Remoción %
Ácido salicílico	207	156	25%
Carbamazepina	ND	ND	NA
Diclofenaco	ND	ND	NA
Ibuprofeno	ND	ND	NA
Naproxeno	ND	ND	NA
Gemfibrozil	ND	ND	NA
Triclosán	4.5	1.5	67%
Mezcla de nonilfenoles (NFs)	14	1.3	91%
Bisfenol-A	15.3	0.3	98%
Butil Bencil Ftalato (BuBeF)	ND	ND	NA
DiEtil Hexil Ftalato (DEHF)	176	182	-3%
Estrona (E1)	ND	ND	NA
Estradiol (E2)	ND	ND	NA
Etinil Estradiol (EE2)	ND	ND	NA

Con miras a obtener la calidad actualizada del agua en el acuífero del Valle del Mezquital y compararla con la NOM-014-CONAGUA-2003 que determina los requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada se hicieron pruebas de un proceso de nanofiltración al agua del manantial Cerro Colorado en el estado de Hidalgo. El proceso se describe en el siguiente capítulo.

VII. METODOLOGÍA

El manantial de Cerro Colorado está ubicado en el municipio de Tlahuelilpan en el estado de Hidalgo (Figura 27) en pleno distrito de riego del Valle del Mezquital. Este manantial abastece a las poblaciones circunvecinas y tiene un gasto de 600 litros por segundo. Al igual que los otros manantiales que han surgido en la zona, procede de la infiltración del agua residual, sin previo tratamiento, empleada para riego. El agua experimenta un tratamiento natural a lo largo de su transporte desde la ciudad de México, y en los canales de riego y por la infiltración en el suelo.

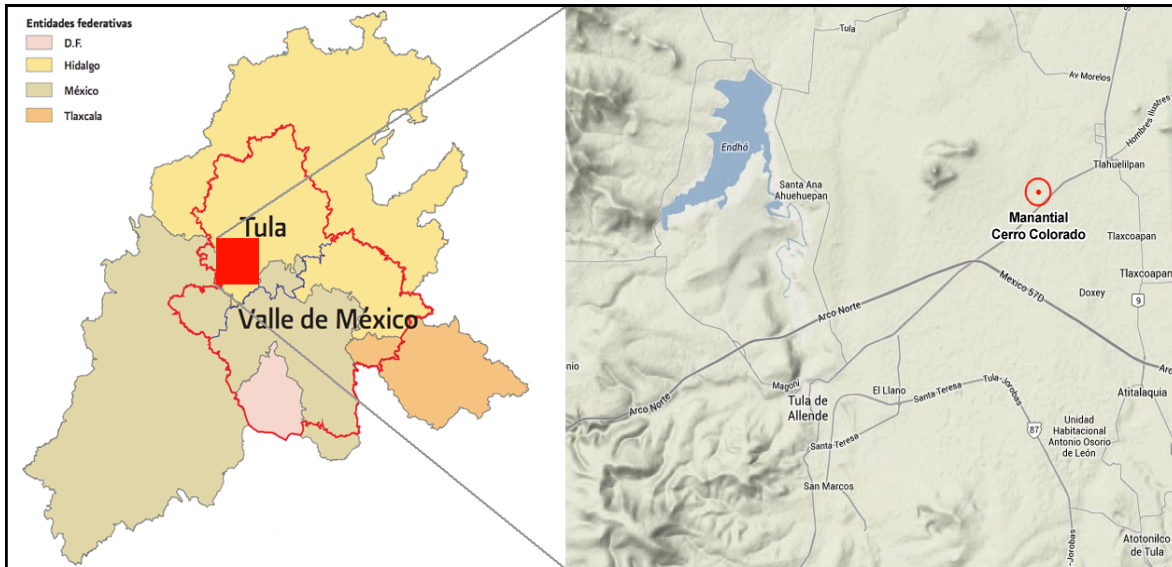


Figura 27. Ubicación del manantial Cerro Colorado. Elaboración propia. Google Earth.

VII.1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DEL MANANTIAL CERRO COLORADO

Para probar la factibilidad del proyecto en materia de calidad, y antes de elegir una membrana para el tratamiento, se realizó la caracterización del agua proveniente del manantial Cerro Colorado, para contrastarla con los parámetros requeridos por la NOM-014-CONAGUA-2003 que determina los requisitos en la calidad del agua de recarga.

Las muestras para la caracterización se tomaron directamente del nivel superficial del manantial Cerro Colorado (Figura 28). Para cada muestra se tomó el volumen necesario y se almacenó y transportó a la Ciudad de México conservando las muestras a una temperatura de 4°C.



Figura 28. Muestreo en el Manantial Cerro Colorado a nivel superficial.

VII.2. SELECCIÓN DE LA MEMBRANA

Una vez que se caracterizó el agua de Cerro Colorado, se procedió a seleccionar la membrana. Para ello deben tomarse en cuenta factores como son: el tipo de aplicación de estas membranas, su disponibilidad en el mercado, rechazo de componentes orgánicos y capacidad para ablandamiento de agua, peso molecular de corte, presión de operación y ángulo de contacto. En la actualidad existen numerosos fabricantes de membranas y la mayoría de ellas tienen diferentes eficiencias para remover la materia orgánica natural o, dureza, en función de varios factores como:

- El tipo y concentración de contaminantes en el agua.
- Las condiciones de operación del sistema (presión, recuperación, condiciones hidrodinámicas).
- Las características inherentes y específicas de cada membrana (material, tamaño de poros, estructura y geometría).

Tomando la experiencia del proyecto desarrollado por el Instituto de Ingeniería (Jiménez *et al.*, 2013) que ya había trabajado con agua del manantial Cerro Colorado, se eligió la membrana NF-270 de la compañía Dow FILMTEC, de esta manera serían comparables los resultados propios con los obtenidos de la bibliografía. Dicha membrana presenta mayores eficiencias en la remoción de los contaminantes emergentes (Tabla 11).

Tabla 11. Parámetros de operación para la membrana NF-270 en las pruebas de Cerro Colorado. Fuente: (Instituto de Ingeniería UNAM, 2013).

Membrana	Flux crítico [Lm-2h-1]	Presión crítica [bar]	Flux de operación [Lm-2h-1]
NF-270	185 ±5.3	5.6 ±1.7	< 185.1

Las membranas seleccionadas (NF-270 40x40) tienen una disposición en espiral y un área efectiva de casi 7 m².

VII.3. PRETRATAMIENTO

El pretratamiento del agua, es necesario para proteger la membrana y mejorar su rendimiento. La protección usualmente se refiere a prevenir el ensuciamiento de las membranas. En muchos casos la reducción en el caudal de permeado durante la operación es debido al ensuciamiento, ello afecta la vida útil de las membranas, mientras que la limpieza continua o cambio de las membranas, provoca retrasos y tiempos muertos.

Los principales responsables del ensuciamiento en un sistema de nanofiltración son las sales inorgánicas poco solubles, los coloides o materia particulada, los compuestos orgánicos disueltos y los microorganismos. El ensuciamiento puede ser controlado a través de la optimización del proceso de filtración, mediante la adecuada elección del tipo y material de la membrana de nanofiltración, la configuración de los módulos y los parámetros de filtración (caudal, presión, temperatura). Sin embargo, lo más apropiado es realizar un pretratamiento del agua de alimentación (AWWA, 1998; Schäfer *et al.*, 2005).

El esquema adecuado de pretratamiento depende de la composición del influente de alimentación. En nanofiltración el pretratamiento es usado para:

- Reducir sólidos suspendidos y minimizar el efecto de los coloides.
- Reducir el ensuciamiento microbiológico en la superficie de la membrana.
- La adición de químicos (antiescalantes, ajuste de pH).
- Remoción de compuestos oxidantes si es requerido (para proteger las membranas).

Para el caso del agua del valle de Tula, se sugiere que el pretratamiento incluya un ablandamiento dada la dureza del agua, una recarbonatación dada la pérdida de carbonatos por el ablandamiento y la filtración misma de la membrana, y una prefiltración dado el posible material coloidal a la entrada del proceso proveniente del manantial (Jiménez *et al.*, 2013).

No obstante, debido a la escala de las pruebas hechas en este estudio, se optó por únicamente filtrar el agua cruda a su entrada al módulo de membranas. Para ello se utilizó un filtro montado en el propio módulo (Figura 30).

VII.4. TRATAMIENTO DEL AGUA DEL MANANTIAL CERRO COLORADO MEDIANTE UN SISTEMA DE MEMBRANA DE NANOFILTRACIÓN

Se habilitó un sistema de membranas a escala piloto (Figura 29), el cual consta de dos entradas tubulares para membranas tipo espiral. En este módulo se instaló una membrana NF-270 previamente seleccionada. El módulo se configuró para trabajar tanto en serie como en paralelo, aunque en esta ocasión se operó de manera unitaria.



Figura 29. Módulo de membranas de nanofiltración operado.

En la Figura 30 se presenta un esquema del funcionamiento del sistema piloto de nanofiltración.

El módulo cuenta con dos sensores para medir en tiempo real el pH y los Sólidos Disueltos Totales (SDT). Tiene un gasto de diseño máximo de $11.4 \text{ m}^3/\text{d}$ ($78.6 \text{ L}/\text{min}$). Para que el sistema sea funcional debe tener un tanque de alimentación, dos bombas que proveen la presión necesaria para las membranas y una válvula de control de la presión de operación y manómetros para determinar la presión prefiltro, postfiltro, (P-1 y P-2 en la

Figura 30, respectivamente) presión de descarga de la bomba y presión después de la membrana.

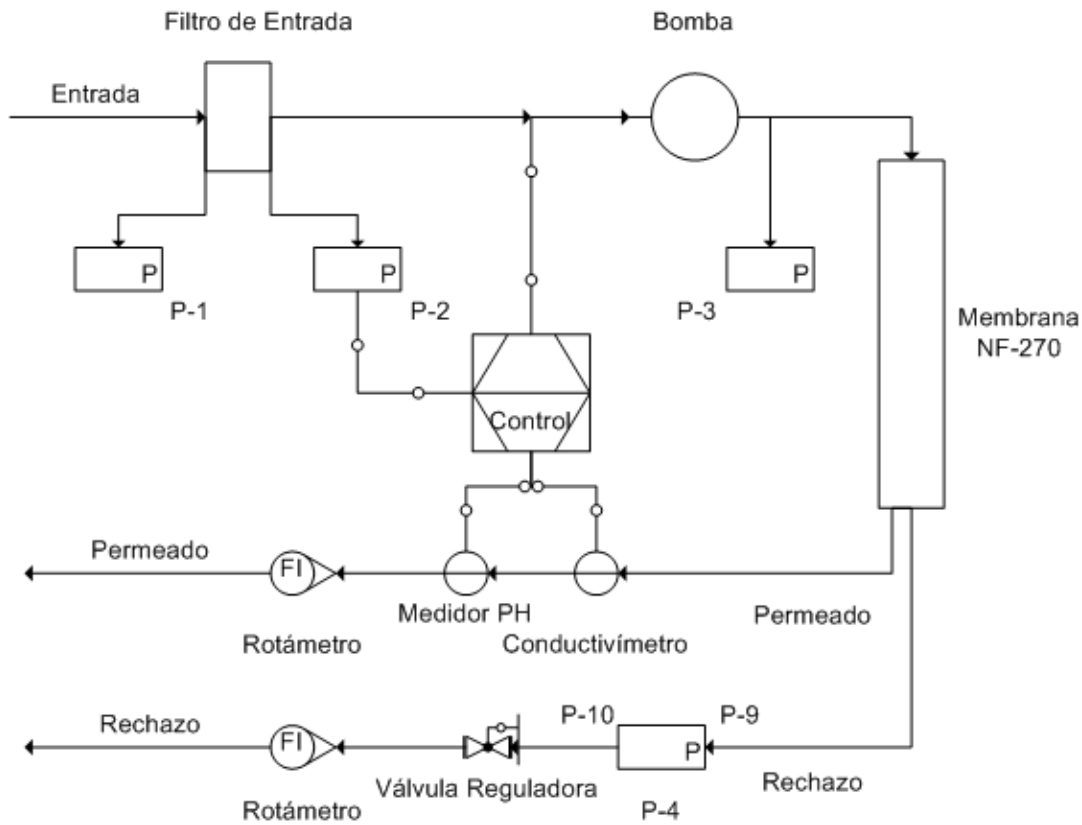


Figura 30. Diagrama del Reactor de membranas usado.

Se instaló el sistema de membranas mediante el uso de tuberías y mangueras flexibles de PVC, en el manantial de Cerro Colorado. Se hizo funcionar por un lapso de 120 minutos previo a tomar las muestras, esto con el fin de “aclimatar” la membrana al agua del manantial. Posteriormente se tomaron las muestras del agua de manantial, se dejó operar el módulo por dos horas más y finalmente se tomaron las muestras del permeado.

Como sucedió en el caso de la caracterización del agua de manantial, las muestras tomadas del permeado del módulo se tomaron en volumen y número suficiente para realizar las pruebas faltantes en el proyecto previamente desarrollado por el Instituto de Ingeniería (Jiménez, *et al.*, 2013), y de esa manera completar la caracterización de los parámetros exigidos por la NOM-014-CONAGUA-2003.

Las muestras fueron almacenadas y transportadas a la Ciudad de México conservando las muestras a una temperatura de 4°C.

Los análisis de las muestras fueron realizados por los laboratorios ABC Química, Investigación y Análisis, S.A. de C.V.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VIII.1. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE MANANTIAL CERRO COLORADO

Los resultados de los análisis al agua cruda del agua del manantial se muestran en la Tabla 12. En ella se destacan los parámetros que no cumplen con los requisitos de calidad especificados por la norma vigente (color rojo).

Tabla 12. Caracterización del agua del Manantial Cerro Colorado.

Parámetro	Unidades	Manantial	Norma Mexicana de Recarga
Parámetros Microbiológicos			
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	12	Ausencia o no detectable
Clostridium perfringens	NMP/100 mL	8	NE
Giardia lamblia	Quistes	3	0
Cryptosporidium	Quistes	4.25	0
Parámetros Físicoquímicos			
pH		7.6	7.5
COT	mg/L	1.88	1
SDT	mg/L	1159	1000
DQO	mg/L	2.9	NE
Redox	mV	-13	NE
Turbiedad	UNT	0.33	5
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	457	NE
Acidez	mg CaCO ₃ /L	15.83	NE
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	670	500
Dureza al Calcio	mg CaCO ₃ /L	607	NE
Absorbancia	%	0.054	NE
Conductividad	μS/cm	1372	NE
Inorgánicos			
Aluminio	mg/L	ND	0.2
Antimonio	mg/L	ND	0.006
Boro	mg/L	0.9575	0.3
Cadmio	mg/L	ND	0.005
Cobre	mg/L	ND	2
Cromo	mg/L	ND	0.05

Parámetro	Unidades	Manantial	Norma Mexicana de Recarga
Digestión Ácida por Microondas	NA	REALIZADA	
Fenoles Totales	mg/L	ND	
Fierro	mg/L	ND	0.3
Fluoruros	mg/L	0.754	1.5
Nitratos	mg/L	16.875	10
Plata	mg/L	ND	0.1
Plomo	mg/L	ND	0.01
Selenio	mg/L	ND	0.05
Sodio	mg/L	228.8	200
Sulfatos	mg/L	156.85	400
Zinc	mg/L	ND	5
Bifenilos Policlorados (BPCs)			
Extracción de BPCs	mg/L	REALIZADA	
Bifenilos Policlorados	mg/L	ND	0.5
Aniones Baja Concentración			
Clorito	mg/L	ND	1
Clorato	mg/L	ND	NE
Bromuro	mg/L	0.3998	NE
Bromato	mg/L	ND	0.01
Plaguicidas Clorados			
Aldrín	mg/L	ND	0.03
Clordano	mg/L	ND	0.2
DDD	mg/L	ND	NE
DDE	mg/L	ND	NE
DDT	mg/L	ND	1
Diieldrin	mg/L	ND	NE
Gama-BCH (Lindano)	mg/L	ND	2
Heptacloro	mg/L	ND	0.03
Heptacloro Epóxido	mg/L	ND	0.03
Hexaclorobenceno	mg/L	ND	1
Metoxicloro	mg/L	ND	20
Plaguicidas Clorados	mg/L	REALIZADA	NE
Ácidos y Fenoles			
Ácido salicílico	ng/L	207	NE
Carbamazepina	ng/L	ND	NE
Diclofenaco	ng/L	ND	NE
Ibuprofeno	ng/L	ND	NE
Naproxeno	ng/L	ND	NE

Parámetro	Unidades	Manantial	Norma Mexicana de Recarga
Gemfibrozil	ng/L	ND	NE
Triclosán	ng/L	4.5	NE
Mezcla de nonilfenoles	ng/L	14	NE
Bisfenol-A	ng/L	15.3	NE
Butil Bencil Ftalato	ng/L	ND	NE
DiEtil Hexil Ftalato	ng/L	176	400
Estrona	ng/L	ND	NE
Estradiol	ng/L	ND	NE
Etinil Estradiol	ng/L	ND	NE

VIII.2. RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DEL MANANTIAL CERRO COLORADO MEDIANTE UN SISTEMA DE MEMBRANA DE NANOFILTRACIÓN

Los resultados de los análisis mostrados en la Tabla 13 fueron muy favorables, mostrando una remoción casi total de los contaminantes regulados.

Tabla 13. Concentración de algunos parámetros regulados por la NOM-014-CONAGUA-2003 antes y después de un tratamiento con membranas de nanofiltración y su grado de remoción. Manantial Cerro Colorado.

Parámetro	Unidades	Entrada	Permeado	Remoción
Aluminio	mg/L	ND	ND	NA
Antimonio	mg/L	ND	ND	NA
Boro	mg/L	0.9575	0.9253	3%
Cadmio	mg/L	ND	ND	NA
Carbono Orgánico Total	mg/L	1.88	0.78	59%
Cobre	mg/L	ND	ND	NA
Cromo	mg/L	ND	ND	NA
Digestión Ácida por Microondas	NA	REALIZADA	REALIZADA	NA
Fenoles Totales	mg/L	ND	ND	NA
Fierro	mg/L	ND	ND	NA
Fluoruros	mg/L	0.754	0.1892	75%
Nitratos (Nitrógeno de)	mg/L	16.875	16.529	2%
Plata	mg/L	ND	ND	NA
Plomo	mg/L	ND	ND	NA
Selenio	mg/L	ND	ND	NA
Sodio	mg/L	228.8	97.62	57%
Sulfatos	mg/L	156.85	5.38	97%
Zinc	mg/L	ND	ND	NA
Bifenilos Policlorados (BPCs)				
Extracción de BPCs	mg/L	REALIZADA	REALIZADA	NA

Parámetro	Unidades	Entrada	Permeado	Remoción
Bifenilos Policlorados en aguas	mg/L	ND	ND	NA
Aniones Baja Concentración				
Clorito	mg/L	ND	ND	NA
Clorato	mg/L	ND	ND	NA
Bromuro	mg/L	0.3998	0.3129	22%
Bromato	mg/L	ND	ND	NA
Plaguicidas Clorados				
Aldrín	mg/L	ND	ND	NA
Clordano	mg/L	ND	ND	NA
DDD	mg/L	ND	ND	NA
DDE	mg/L	ND	ND	NA
DDT	mg/L	ND	ND	NA
Dieldrin	mg/L	ND	ND	NA
Gama-BCH (Lindano)	mg/L	ND	ND	NA
Heptacloro	mg/L	ND	ND	NA
Heptacloro Epóxido	mg/L	ND	ND	NA
Hexaclorobenceno	mg/L	ND	ND	NA
Metoxicloro	mg/L	ND	ND	NA
Extracción de Plaguicidas Clorados	mg/L	REALIZADA	REALIZADA	NA

Los resultados, en suma a los obtenidos por el Instituto de Ingeniería (Jiménez, *et al.*, 2013) para un proceso de tratamiento mediante membranas de nanofiltración se describen en la Tabla 14.

Tabla 14. Resultados de las muestras antes y después del tratamiento con membranas de nanofiltración, más los resultados obtenidos por el proyecto del Instituto de Ingeniería (Jiménez, *et al.*, 2013).

Parámetro	Unidades	Manantial	Permeado	Remoción
Parámetros Microbiológicos				
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	12	ND	100%
Clostridium perfringens	NMP/100 mL	8	ND	100%
Giardia lamblia	Quistes	3	ND	100%
Cryptosporidium	Quistes	4.25	ND	100%
Parámetros Físicoquímicos				
pH		7.6	7.85	NA
COT	mg/L	1.88	0.78	58.5%
SDT	mg/L	1159	467	59.7%
DQO	mg/L	2.9	21.6	-644.8%
Redox	mV	-13	-45	-246.2%
Turbiedad	UNT	0.33	0	100.0%
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	457	24	94.7%
Acidez	mg CaCO ₃ /L	15.83	ND	NA
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	670	9.01	98.7%
Dureza al Calcio	mg CaCO ₃ /L	607	3	99.5%
Absorbancia	%	0.054	0.005	90.7%

Parámetro	Unidades	Manantial	Permeado	Remoción
Conductividad	μS/cm	1372	5.13	99.6%
Inorgánicos				
Aluminio	mg/L	ND	ND	NA
Antimonio	mg/L	ND	ND	NA
Boro	mg/L	0.9575	0.9253	3.4%
Cadmio	mg/L	ND	ND	NA
Cobre	mg/L	ND	ND	NA
Cromo	mg/L	ND	ND	NA
Digestión Ácida por Microondas	NA	REALIZADA	REALIZADA	NA
Fenoles Totales	mg/L	ND	ND	NA
Fierro	mg/L	ND	ND	NA
Fluoruros	mg/L	0.754	0.1892	74.9%
Nitratos	mg/L	16.875	16.529	2.1%
Plata	mg/L	ND	ND	NA
Plomo	mg/L	ND	ND	NA
Selenio	mg/L	ND	ND	NA
Sodio	mg/L	228.8	97.62	57.3%
Sulfatos	mg/L	156.85	5.38	96.6%
Zinc	mg/L	ND	ND	NA
Bifenilos Policlorados (BPCs)				
Extracción de BPCs	mg/L	REALIZADA	REALIZADA	NA
Bifenilos Policlorados	mg/L	ND	ND	NA
Aniones Baja Concentración				
Clorito	mg/L	ND	ND	NA
Clorato	mg/L	ND	ND	NA
Bromuro	mg/L	0.3998	0.3129	21.7%
Bromato	mg/L	ND	ND	NA
Plaguicidas Clorados				
Aldrin	mg/L	ND	ND	NA
Clordano	mg/L	ND	ND	NA
DDD	mg/L	ND	ND	NA
DDE	mg/L	ND	ND	NA
DDT	mg/L	ND	ND	NA
Dieldrin	mg/L	ND	ND	NA
Gama-BCH (Lindano)	mg/L	ND	ND	NA
Heptacloro	mg/L	ND	ND	NA
Heptacloro Epóxido	mg/L	ND	ND	NA
Hexaclorobenceno	mg/L	ND	ND	NA
Metoxicloro	mg/L	ND	ND	NA
Plaguicidas Clorados	mg/L	REALIZADA	REALIZADA	NA

Parámetro	Unidades	Manantial	Permeado	Remoción
Ácidos y Fenoles				
Ácido salicílico	ng/L	207	156	24.6%
Carbamazepina	ng/L	ND	ND	NA
Diclofenaco	ng/L	ND	ND	NA
Ibuprofeno	ng/L	ND	ND	NA
Naproxeno	ng/L	ND	ND	NA
Gemfibrozil	ng/L	ND	ND	NA
Triclosán	ng/L	4.5	1.5	66.7%
Mezcla de nonilfenoles	ng/L	14	1.3	90.7%
Bisfenol-A	ng/L	15.3	0.3	98.0%
Butil Bencil Ftalato	ng/L	ND	ND	NA
DiEtil Hexil Ftalato	ng/L	176	182	-3.4%
Estrona	ng/L	ND	ND	NA
Estradiol	ng/L	ND	ND	NA
Etinil Estradiol	ng/L	ND	ND	NA

Los parámetros de calidad en el permeado en suma a los obtenidos por el Instituto de Ingeniería fueron comparados con los requeridos por la NOM-014-CONAGUA-2003 de la Comisión Nacional del Agua y como referencia se compararon también con las guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para agua potable Tabla 15.

Tabla 15. Comparación entre los resultados obtenidos del tratamiento con membranas de nanofiltración, la Norma Oficial Mexicana y las guías de la organización mundial de la salud.

Parámetro	Unidades	Permeado	Norma Mexicana	OMS 2011
Parámetros Microbiológicos				
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	ND	Ausencia o no detectable	NE
Clostridium perfringens	NMP/100 mL	ND	NE	NE
Giardia lamblia	Quistes	ND	0	NE
Cryptosporidium	Quistes	ND	0	NE
Parámetros Físicoquímicos				
pH		7.85	6.5-8.5	NE
COT	mg/L	0.78	1	NE
SDT	mg/L	467	1000	NE
DQO	mg/L	21.6	NE	NE
Redox	mV	-45	NE	NE
Turbiedad	UNT	0	5	5
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	24	NE	NE
Acidez	mg CaCO ₃ /L	ND	NE	NE
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	9.01	500	NE

Parámetro	Unidades	Permeado	Norma Mexicana	OMS 2011
Dureza al Calcio	mg CaCO3/L	3	NE	NE
Absorbancia	%	0.005	NE	NE
Conductividad	µS/cm	5.13	NE	NE
Inorgánicos				
Aluminio	mg/L	ND	0.2	0.2
Antimonio	mg/L	ND	0.006	0.02
Boro	mg/L	0.9253	0.3	2.4
Cadmio	mg/L	ND	0.005	0.003
Cobre	mg/L	ND	2	2
Cromo	mg/L	ND	0.05	0.05
Digestión Ácida por Microondas	NA	REALIZADA		
Fenoles Totales	mg/L	ND		
Fierro	mg/L	ND	0.3	NE
Fluoruros	mg/L	0.1892	1.5	1.5
Nitratos	mg/L	16.529	10	11
Plata	mg/L	ND	0.1	NE
Plomo	mg/L	ND	0.01	0.01
Selenio	mg/L	ND	0.05	0.04
Sodio	mg/L	97.62	200	50
Sulfatos	mg/L	5.38	400	NE
Zinc	mg/L	ND	5	NE
Bifenilos Policlorados (BPCs)				
Extracción de BPCs	mg/L	REALIZADA		
Bifenilos Policlorados	mg/L	ND	0.5	NE
Aniones Baja Concentración				
Clorito	mg/L	ND	1	0.7
Clorato	mg/L	ND	NE	0.7
Bromuro	mg/L	0.3129	NE	NE
Bromato	mg/L	ND	0.01	0.01
Plaguicidas Clorados				
Aldrin	mg/L	ND	0.03	0.03
Clordano	mg/L	ND	0.2	0.2
DDD	mg/L	ND	NE	NE
DDE	mg/L	ND	NE	NE
DDT	mg/L	ND	1	1
Dieldrin	mg/L	ND	NE	NE
Gama-BCH (Lindano)	mg/L	ND	2	2
Heptacloro	mg/L	ND	0.03	NE
Heptacloro Epóxido	mg/L	ND	0.03	NE
Hexaclorobenceno	mg/L	ND	1	NE

Parámetro	Unidades	Permeado	Norma Mexicana	OMS 2011
Metoxicloro	mg/L	ND	20	20
Plaguicidas Clorados	mg/L	REALIZADA	NE	NE
Ácidos y Fenoles				
Ácido salicílico	ng/L	156	NE	NE
Carbamazepina	ng/L	ND	NE	NE
Diclofenaco	ng/L	ND	NE	NE
Ibuprofeno	ng/L	ND	NE	NE
Naproxeno	ng/L	ND	NE	NE
Gemfibrozil	ng/L	ND	NE	NE
Triclosán	ng/L	1.5	NE	NE
Mezcla de nonilfenoles	ng/L	1.3	NE	NE
Bisfenol-A	ng/L	0.3	NE	NE
Butil Bencil Ftalato	ng/L	ND	NE	NE
DiEtil Hexil Ftalato	ng/L	182	400	NE
Estrona	ng/L	ND	NE	NE
Estradiol	ng/L	ND	NE	NE
Etinil Estradiol	ng/L	ND	NE	NE

Como puede observarse, a excepción de dos parámetros (Boro y Nitratos), el tratamiento por medio de membranas de nanofiltración da como resultado agua de calidad suficiente para llevar a cabo una recarga directa al acuífero según la norma de la Comisión Nacional del Agua.

El boro es un elemento químico utilizado en la manufactura del cristal, jabones y detergentes, y por tanto elemento característico del agua residual.

El valor máximo permitido por la Norma Oficial Mexicana es de 0.3 mg/L de Boro, no obstante, la OMS indica que un máximo de 2.4 mg/L es suficiente para evitar la toxicidad. Dado que el valor obtenido en el permeado es de 0.93 mg/L y ya que el tratamiento para eliminar nitratos (que veremos a continuación) es también efectivo para reducir el contenido de Boro, podemos omitir un análisis mayor.

Los nitratos (NO_3^-) son iones compuestos por tres átomos de oxígeno y uno de nitrógeno, con carga negativa y se encuentran disueltos en el agua, la abundancia de éstos se debe entre otras razones al uso desmedido de abonos nitrogenados, los residuos de mataderos, destilerías, azucareras, industrias de levadura, de almidón y textiles.

Entre los daños a la salud que provoca el exceso de nitratos en el agua esta la metahemoglobinemia, una condición en la cual la hemoglobina en la sangre es incapaz de liberar oxígeno de manera efectiva a los tejidos corporales. Son los infantes menores de tres meses y personas con problemas gástricos los más afectados por este padecimiento.

Según la Norma Oficial Mexicana, los nitratos presentes en el agua de recarga no deben superar los 10 mg/L; para la OMS, el valor máximo recomendado es de 11 mg/L. El permeado del proceso de tratamiento con membranas de nanofiltración arrojó un total de 16.5 mg/L.

Para eliminar por completo el nitrato que no es removido por el proceso de nanofiltración, se propone usar el método de intercambio iónico. Según la OMS, en aguas subterráneas un proceso de intercambio iónico permitiría reducir el nivel de nitratos al menos hasta 5mg/L (Organización Mundial de la Salud, 2011).

El intercambio iónico es un proceso de purificación que involucra un electrolito (solución que contiene los iones, en este caso los nitratos) y una resina intercambiadora de iones. Consiste en poner en contacto la solución con la resina para que mediante un proceso de adsorción, los nitratos queden “pegados” a la resina.

Por lo antes mencionado, previo a un dispositivo de recarga, el agua debe pasar por un tren de pretratamiento que incluya un sistema de intercambio iónico y el proceso de membranas de nanofiltración, y así cumplir con la Norma Oficial Mexicana para recarga directa del acuífero.

No obstante de los resultados obtenidos por el presente estudio, se sugiere realizar un análisis más profundo del tratamiento propuesto, que comprenda un muestreo rutinario al menos dos o tres veces al mes durante un año para dar seguridad al proceso.

VIII.3. RE ABASTECIMIENTO A LA RED DE AGUA POTABLE

Habiendo encontrado que la calidad alcanzada es superior a la requerida por la NOM-127-SSA1-1994 para agua potable, debe reconocerse la posibilidad de introducir el agua proveniente del Manantial Cerro Colorado directamente a la red de agua potable de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Esto se conoce como recarga virtual al acuífero, que se basa en el principio de que el agua recargada al acuífero es equivalente al agua que se deja de sacar cuando se obtiene de otra parte.

Uno de los principales obstáculos para implementar la recarga virtual en el escenario de la Ciudad de México, es la conducta social de rechazar agua residual tratada para su consumo, el utilizar el agua para recargar el acuífero crea la percepción de que el agua que están recibiendo (extraída de los pozos de la ZMCM) es de mejor calidad.

Por otro lado, el hecho de recargar el agua al acuífero es una alternativa más amigable con el medio ambiente, pues es una manera de preservar la cantidad y calidad del agua contenida en el acuífero de la Ciudad de México.

IX. CONCLUSIONES

El manejo que se está haciendo actualmente del agua en el Valle de México es inadecuado e insostenible. Existen serios problemas en casi todos los aspectos de la Gestión Integral de los Recursos Hídricos, entre los que se destaca:

- a) **La cuenca no es autosostenible:** en lugar de buscar el aumento de la eficiencia del agua dentro de la cuenca, con la reducción de fugas, el reúso de aguas grises y el tratamiento de las aguas residuales, se importa una quinta parte del agua desde otras cuencas (sistema Lerma-Cutzamala).
- b) **Las fuentes están siendo sobreexplotadas:** en promedio, los 7 acuíferos incluidos en la Cuenca del Valle de México presentan un grado de explotación de 227%, es decir que en promedio se extrae más del doble del agua que se recarga.
- c) **El abastecimiento no es universal:** a pesar de la importación del agua y de la sobreexplotación de la cuenca, aún existen sitios en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, donde no se cuenta con un servicio continuo de agua y la presión de agua que reciben no es suficiente. Es entonces que suceden los denominados “tandeos” en donde se interrumpe con regularidad el servicio de agua potable; estos grandes cambios de presión provocan intrusiones contaminantes y fugas en las conducciones.
- d) **No existe una cultura del cuidado del agua:** por si fuera poco, en muchas ocasiones, la escasa agua que llega a los hogares, tiene un mal uso. La eficiencia del agua no sólo se mide en su distribución y en su reúso a gran escala, sino también a nivel doméstico. Hace falta promover un uso más adecuado del recurso: incentivar los sistemas de reúso de aguas grises en el hogar, la utilización de W.C. más eficientes y de regaderas ahorradoras.
- e) **Saneamiento insuficiente:** actualmente se trata sólo el 11% del agua residual generada (Comisión Nacional del Agua 2009), en plantas que generalmente utilizan el agua tratada para riego de áreas verdes, las aguas residuales restantes son en su mayoría dispuestas en el Valle de Tula provocando problemas de salud.

La construcción de un sistema que recargue el acuífero de la Ciudad de México, en conjunto con un adecuado tratamiento del agua permitiría:

- a) **Acercarse a tener una cuenca autosostenible:** con el reúso de las aguas residuales de la ZMVM se dejaría de depender de otras cuencas para el abastecimiento del agua potable.
- b) **Reducir o eliminar la sobreexplotación:** la recarga artificial del acuífero de la Ciudad de México resultaría en un balance más positivo para el acuífero.
- c) **Lograr el abastecimiento universal:** Con una disponibilidad mayor de agua potable, la Ciudad de México podría finalmente brindar un servicio continuo y evitar los problemas provocados por el tandeo.
- d) **Crear conciencia social en cuanto al cuidado del agua:** la creación de este tipo de proyectos para el abastecimiento a gran escala debe ser aprovechada por la

administración pública como parte aguas para crear conciencia en la sociedad del trabajo que implica llevar el recurso a los hogares.

- e) **Un mayor saneamiento del agua:** como se estudió, la construcción de un dispositivo de recarga conlleva el tratamiento avanzado del agua a recargar, pero no sólo es el reúso del agua el que estamos asegurando, introduciendo agua de tan alta calidad al acuífero garantiza también que no se contamine el cuerpo subterráneo.

Debido a las características geográficas, geológicas e hidrológicas de la Zona Metropolitana del Valle de México, se propuso un dispositivo de recarga directa al acuífero, no obstante para poner en funcionamiento un dispositivo de este tipo es necesario que el agua de recarga cumpla con parámetros de calidad que difícilmente se cumplen con tratamiento convencional. Se observó que un tren de tratamiento incluyendo un proceso de intercambio iónico y un tratamiento con membranas de nanofiltración produce agua de calidad suficiente para cumplir con los requisitos de la norma y que es además de mejor calidad que el agua incluida en el acuífero (Comisión Nacional del Agua, 2009).

IX.1. RECOMENDACIONES

Como se mencionó anteriormente, debe evaluarse a mayor profundidad el tratamiento que ha de darse al agua previo a su recarga al acuífero; el desempeño del pretratamiento propuesto (intercambio iónico) así como la filtración con nanomembranas deben ser probados a largo plazo para garantizar la seguridad del agua.

Se recomienda hacer una evaluación de calidad con agua tomada directamente del acuífero del Valle de Tula, pues para el abastecimiento a mayor escala se realizarían pozos de extracción y no se tomaría del manantial.

Debe realizarse un estudio geohidrológico a mayor profundidad del sitio más recomendable para llevar a cabo la recarga al acuífero de la Ciudad de México, para ello deben respetarse los parámetros indicados en la NOM-014-CNA-2003.

Para llevar a cabo una movilización tan importante de agua no hay que olvidar los efectos sociales que tendrá, tanto en la zona de extracción, como en la zona en que se consumirá. Se recomienda se lleven a cabo estudios sociológicos para conocer la percepción que tienen los habitantes del Valle de Tula, así como los capitalinos.

X. APÉNDICE

X.1. CARACTERÍSTICAS, VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PROCESOS DE REINYECCIÓN AL ACUÍFERO

X.1.1. SISTEMAS DE DISPERSIÓN.

Tipo de dispositivo	Aspecto	Observación
Balsas de infiltración	Características deseables	Formaciones de alta permeabilidad
		Litología detrítica, aluvial o kárstica
		Idóneo en zonas regables con aguas subterráneas y acuíferos libres.
		Pendientes de 0 a 10 %
		Niveles freáticos cercanos a la superficie (<50m)
		Idóneo en zonas de depuradoras por lagunas
		Fuentes de disponibilidad de agua a menos de 10 km
	Ventajas	Recarga acuífero libre
	Desventajas	Ocupación terreno
		Taludes estables para cada litología
		Necesidad de operaciones de limpieza y mantenimiento en seco
		Problemas por desbordamientos
		En caso de calidad de aguas muy dispar se deben emplear técnicas de inducción de calidad
	Aspectos Medioambientales	Posibilidad uso para toma de agua (incendios forestales...)
		Posibilidad asentamiento avifauna
Posibilidad regeneración hídrica ecosistemas húmedos degradados		
Canales de infiltración	Características deseables	Zonas con excedentes hídricos de origen fluvial o depuradoras
		Trazados lo más rectilíneos posible para evitar llagas y desprendimientos
		Pendientes menores del 20%
		Debe haber represas y dispositivos de parada que eviten el efecto cascading
		Evitar la oxigenación de las aguas por batido
		Controlar el nivel del agua en el canal con objeto de que la tasa de infiltración sea la mayor posible
	Ventajas	Posibilidad enterrar tramos mediante tuberías troqueladas en zanjas filtrantes
		Dispositivo idóneo en zonas de montaña en poblaciones (áreas urbanas)
	Desventajas	Problemas de estabilidad de taludes dependientes de la morfología y litología

Tipo de dispositivo	Aspecto	Observación
		Ocupación superficial del terreno
		Dificultad para el enterramiento del canal en tramos determinados
		Dispositivo poco apropiado en zonas urbanas, salvo de montaña
	Aspectos Medioambientales	Efecto barrera
		Rápido crecimiento de vegetación de ribera (+/-) Afección a algunas especies vegetales al inundar su zona radicular
Técnicas de tratamiento suelo/ acuífero	Características deseables	La distancia entre los caballones debe rondar los 80 cm en acuíferos arenosos
		En el fondo de canales arenosos se pueden intercalar geotextiles hasta el intervalo 40-60 cm de profundidad
		Se debe evitar el batido de las aguas
	Ventajas	Aumento de la tasa de infiltración al doble en detríticos frente a fondos planos
		Operaciones de limpieza más simples que en fondo plano
		Es viable intercalar geotextiles semienterrados con objeto de facilitar las operaciones de limpieza
		Adecuados en zonas de cabecera
		Adecuados en llanuras de inundación
	Desventajas	Necesidad de retirar a vertedero gran parte de los procesos colmatantes generados
		Posibilidad de transferir materiales colmatados por otros sin colmatar (minería de transferencia)
Aspectos Medioambientales	Al ser estructuras intercaladas en dispositivos, su impacto adicional es positivo	
Campos de infiltración	Características deseables	Terreno declarado zona inundable
		Cercanía a cauces fluviales, humedales o depuradoras (Máx. 2-3km)
		Habituales junto a depuradoras por lagunaje
		Zonas de permeabilidad alta o muy alta
		Litología aluvial, kárstica o detrítica
		Pendientes menores del 10%
		En llanuras de inundación poco encajadas Adecuados en zonas costeras con altitud menor de 5 m (marismas)
	Ventajas	Uso estacional amortiguando inundaciones
	Desventajas	Uso incompatible con canales o balsas de infiltración por riesgo de inundación
		Necesidad de mantenimiento en caso de labrar caballones
		En zonas inundables resulta incompatible con la presencia de otros dispositivos
	Aspectos	Alto valor en zonas inundables costeras y de marismas

Tipo de dispositivo	Aspecto	Observación
	Medioambientales	Lugar proclive para asentamiento de avifauna
Recarga por retornos de riego	Características deseables	Zonas regables del PNR con aguas de origen superficial
		Zonas con riesgo de inundación muy bajo o nulo
		Aguas de salinidad baja o media
		En acuíferos libres con una profundidad del agua subterránea menor de 75 m
		Altos retornos en zonas urbanas por fugas de alcantarillado (recarga accidental)
	Ventajas	Zonas con permeabilidad media a muy alta y cualquier litología
	Desventajas	Salinización del suelo con dosis de lavado escasas
	Aspectos Medioambientales	Los retornos en zonas regadas con aguas subterráneas conllevan impactos negativos
Los retornos accidentales en zonas urbanas en ocasiones son aguas de baja calidad		

X.1.2. SISTEMAS DE CANALES

Tipo de dispositivo	Aspecto	Observación
Diques de retención y represas	Características deseables	Afloramientos permeables
		Litologías aluviales, kársticas, detrítico, volcánico e intrusivo por fisuración
		Adecuados en zonas regables
		Adecuados en las inmediaciones de embalses
		Adecuados en zonas con un cierto riesgo de inundación
		Adecuados en zonas de cabecera de cuenca y áreas forestales
		Idóneo incluso en zonas de elevadas pendientes (valles encajados)
		Los diques de corrección hidrológica conllevan recarga accidental
		En un rango altitudinal alto
		Proclive en macizos cristalinos con triple porosidad
	Ventajas	Uso conjunto adecuado para corrección hidrológico forestal y recarga artificial
		Permiten la laminación de avenidas
		Retención de aludes y movimientos gravitatorios en zonas de montaña
Desventajas	Retención de sedimentos	
	Problemas de colmatación	
Aspectos Medioambientales	Cierta impacto visual negativo	
	Retención de sedimentos	
	Los impactos positivos sobrepasan los negativos	
Diques permeables	Características deseables	Afloramientos permeables
		Litologías aluviales, kársticas, detrítico, volcánico e intrusivo por fisuración
		Adecuados en zonas regables
		Adecuados en las inmediaciones de embalses
		Adecuados en zonas con un cierto riesgo de inundación
		Adecuados en zonas de cabecera de cuenca y áreas forestales
		Idóneo en valles fluviales con cualquier encajamiento
		Los diques de corrección hidrológica conllevan recarga accidental
		En un rango altitudinal alto y medio
		Proclive en macizos cristalinos con triple porosidad
	Ventajas	Uso conjunto adecuado para corrección hidrológico forestal y recarga artificial
		Permiten la laminación de avenidas
	Desventajas	Retención de sedimentos
Problemas de colmatación		
Necesidad de mantenimiento		
Frecuentes problemas geotécnicos (roturas,		

Tipo de dispositivo	Aspecto	Observación
		desprendimientos...)
	Aspectos Medioambientales	Cierto impacto visual negativo
		Retención de sedimentos
		Los impactos positivos sobrepasan los negativos
Serpenteos	Características deseables	Dispositivo típico de formaciones aluviales
		Zonas con riesgo de inundación alto o medio
		Zonas de escasa pendiente (<10%)
		Acuíferos libres con el nivel del agua somero
		No es óptimo para zona urbanas
		Inapropiado para zonas de alta montaña y cabeceras de cuenca
	Ventajas	Formaciones aluviales
		Posibilidad de intercalar barreras artificiales (hinchables...) y estructuras flotantes
	Desventajas	Impacto visual
	Aspectos Medioambientales	Incidencia en el régimen hidrodinámico del río
Posible incidencia en la vegetación de ribera		
Escarificación lecho	Características deseables	Dispositivo típico de formaciones aluviales
		Zonas con riesgo de inundación alto
		Precisa agua de buena calidad
		Zonas de escasa pendiente (<10%)
		Acuíferos libres con el nivel del agua somero
		No es óptimo para zona urbanas
		Inapropiado para zonas de alta montaña y cabeceras de cuenca
	Ventajas	Formaciones aluviales
		Técnica barata
	Desventajas	Afección vegetación acuática y especies piscícolas
		Algunos autores dudan de la efectividad del método
	Aspectos Medioambientales	Incidencia en el régimen hidrodinámico del río
		Posible incidencia negativa en la vegetación y fauna fluvial

X.1.4. SISTEMAS PROFUNDOS O DE POZOS

Tipo de dispositivo	Aspecto	Observación
Diques sub superficiales/subterráneos	Características deseables	Litologías aluviales, kársticas, detrítico, volcánico e intrusivo por fisuración
		Adecuados en zonas con afloramientos evaporíticos (incidencia en la calidad)
		Adecuados en las inmediaciones de embalses
		Idóneo incluso en zonas de elevadas pendientes (valles encajados)
		Los diques de corrección hidrológica conllevan recarga accidental
		Posibilidad de crear estructuras tipo aljibe protegidas de la evaporación
	Ventajas	Uso conjunto adecuado para corrección hidrológico forestal y recarga artificial
		Permiten el abastecimiento a pequeñas poblaciones con filtración
		Técnica parecida al RBF con inducción
		Permite corregir problemas geotécnicos en zonas urbanas
	Desventajas	Retención de sedimentos
		Problemas de colmatación
		Requiere cierto mantenimiento y reemplazo eventual de la arena filtrante
	Aspectos Medioambientales	No hay impacto visual
		Retención de sedimentos
		Los impactos positivos sobrepasan los negativos
Mejora de la calidad de las aguas		
Diques perforados	Características deseables	Afloramientos permeables
		Litologías aluviales, detrítico, volcánico e intrusivo por fisuración
		Adecuados en zonas regables
		Adecuados en las inmediaciones de embalses
		Inapropiados en zonas con alto riesgo de inundación
		Adecuados en zonas de cabecera de cuenca, áreas forestales y minas
		Idóneo en valles fluviales con cualquier encajamiento
		Los diques de corrección hidrológica conllevan recarga accidental
		En un rango altitudinal alto y medio
	Ventajas	Uso conjunto adecuado para corrección hidrológico forestal y recarga artificial
		Permiten la laminación de avenidas
	Desventajas	Retención de sedimentos
		Problemas de colmatación

Tipo de dispositivo	Aspecto	Observación
		Necesidad de mantenimiento y taponamiento de conducciones
		Frecuentes problemas geotécnicos (roturas, desprendimientos...)
		No recomendable dentro de zonas urbanas
		Más alejado de cauces que los diques permeables
	Aspectos Medioambientales	Cierta impacto visual negativo
		Retención de sedimentos
Los impactos positivos sobrepasan los negativos		
Qanats. Galerías subterráneas	Características deseables	Apropiado en materiales detríticos, kársticos y volcánicos
		Idóneos para inmediaciones de embalses
		Posibilidad de acondicionar minas abandonadas
		En zonas con pendientes elevadas, especialmente volcánicas
		Nivel del agua a una profundidad inferior a 50 m
	Ventajas	Adecuado para zonas áridas al reducir la evaporación
	Desventajas	Riesgo de variaciones de la calidad de las aguas por su configuración
		Posibilidad de derrumbes y colapsos, especialmente tras eventos tipo avenida
Aspectos Medioambientales	Escaso impacto visual	
Pozos abiertos de infiltración	Características deseables	Dispositivo apto para todas las litologías, incluido hard rocks
		No apto en zonas inundables
		En superficies con pendiente moderada o media
		Nivel del agua somero o intermedio (menos de 50 m)
		No apto en masas forestales
	Ventajas	Idóneo en las inmediaciones de depuradoras
		Idóneo alrededor de pequeños pueblos
		Idóneo cerca de la costa
	Desventajas	Riesgo de contaminación apreciable
	Aspectos Medioambientales	Precisan de protección adecuada para evitar la caída de ganado y fauna
Pozos profundos y mini sondeos	Características deseables	Dispositivo apto para todas las litologías, incluido hard rocks
		No apto en zonas inundables
		En superficies con pendiente moderada o media
		Nivel del agua somero o intermedio (menos de 50 m)
		No apto en masas forestales
	Ventajas	Idóneo en las inmediaciones de depuradoras
		Idóneo alrededor de pequeños pueblos
		Idóneo cerca de la costa
	Desventajas	Riesgo de contaminación apreciable
		Posibles problemas geotécnicos en zonas urbanas y edificaciones

Tipo de dispositivo	Aspecto	Observación
		Oxigenación de las aguas y reducción de la tasa de infiltración si el agua cae por gravedad desde la superficie
	Aspectos Medioambientales	Precisan de protección adecuada para evitar la caída de ganado y fauna
Sondeos	Características deseables	Dispositivo apto para litologías detríticas y kársticas
		No apto en zonas inundables
		En superficies con pendiente moderada
		Nivel del agua intermedio o profundo (más de 50 m)
		No apto en masas forestales
	Apto en zonas regables con aguas subterráneas	
	Ventajas	Posibilidad de inyección profunda e inducida
	Desventajas	Riesgo de salinización
		No apto en zonas con riesgo de inundación salvo protección extrema
		Requiere alimentación eléctrica para la inyección
		Sistema de válvulas complejo
Caro de construir y mantener		
Aspectos Medioambientales	Posibilidad de problemas geotécnicos (asientos, grietas...)	
Dolinas, colapsos	Características deseables	En zonas kársticas
		Posibilidad de utilizar minas abandonadas
		Requiere agua de buena calidad
	No recomendable en zonas urbanas	
	Ventajas	Aprovechamiento de formas preexistentes
	Desventajas	Híper oxidación de los minerales del acuífero si el agua cae por gravedad
Aspectos Medioambientales	Precisa conducciones desde las fuentes de toma (ríos, embalses y depuradoras)	
	Posibilidad de riesgos geotécnicos elevados (nuevos colapsos)	
ASR	Características deseables	Dispositivo apto para litologías detríticas principalmente No apto en zonas inundables salvo altísima protección del dispositivo
		En superficies con pendiente moderada
		Nivel del agua profundo (más de 50 m)
		No apto en masas forestales
		Apto en zonas regables con aguas subterráneas
	Ventajas	Posibilidad de inyección profunda e inducida
	Desventajas	Riesgo de salinización
		No apto en zonas con riesgo de inundación salvo protección extrema
		Requiere alimentación eléctrica para la inyección
		Sistema de válvulas complejo
Precisa instalaciones complementarias		

Tipo de dispositivo	Aspecto	Observación
	Aspectos Medioambientales	Posibilidad de problemas geotécnicos (asientos, grietas...)
ASTR	Características deseables	Dispositivo apto para litologías detríticas principalmente
		No apto en zonas inundables salvo altísima protección del dispositivo (en ambos sondeos)
		En superficies con pendiente moderada
		Nivel del agua profundo (más de 50 m)
		No apto en masas forestales
		Apto en zonas regables con aguas subterráneas
		Requiere un alto conocimiento del acuífero y de la zona de tránsito
	Ventajas	Posibilidad de inyección profunda e inducida
	Desventajas	Riesgo de salinización
		No apto en zonas con riesgo de inundación salvo protección extrema
		Requiere alimentación eléctrica para la inyección
		Sistema de válvulas complejo
		Precisa instalaciones complementarias
		Carencia en su construcción y mantenimiento
Aspectos Medioambientales	Posibilidad de problemas geotécnicos (asientos, grietas...)	
	Problemas derivados de la introducción de aire en el acuífero	
	Cambios cualitativos esperables	

X.1.5. SISTEMAS DE FILTRACIÓN

Tipo de dispositivo	Aspecto	Observación
Bancos filtrantes en lechos de ríos (RBF)	Características deseables	Formaciones exclusivamente aluviales
		Adecuada en la inmediación de embalses
		Zonas de pendiente muy baja en general
		Calidad de las aguas aceptable
		Zonas con el nivel del agua relativamente somero
	Ventajas	La técnica permite su asociación de depuradoras de tamaño medio y elevado
		Idóneo para abastecimiento de ciudades fluviales
	Desventajas	Determinadas sustancias no son reducidas mediante la técnica RBF
		Problemas de colmatación frecuentes
		Su ubicación en zonas inundables requiere una alta protección de las captaciones
	Aspectos Medioambientales	Muchas más ventajas que desventajas
		Requiere tuberías y canalizaciones que conecten el banco del río con la ciudad
	Filtración	Características

Tipo de dispositivo	Aspecto	Observación
	deseables	Suelen venir cartografiadas como dunas A escasa distancia de la costa
		Zonas áridas en general
		Baja altitud
		Salinidad media y alta
	Ventajas	suelen contar con cartografías detalladas
	Desventajas	Dificultad en dunas fosilizadas
	Aspectos Medioambientales	Suelen ser zonas muy frágiles desde el punto de vista del ecosistema
	Dificultad para llevar a cabo actuaciones con bajo impacto (ecosistema muy frágil)	
Riego subterráneo	Características deseables	Nivel del agua somero
		Recarga en general accidental
		Zonas regables con aguas de cualquier origen excluyendo retornos
	Ventajas	Técnica de aprovechamiento de fugas
		Uso de dosis excesivas de lavado del suelo en el regadío
	Desventajas	Si la dosis de lavado es adecuada y la eficiencia del riego alta, la recarga es despreciable
Aspectos Medioambientales	Solo los sistemas de gestión inapropiados permiten esta técnica	

X.1.7. SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE LLUVIA

Tipo de dispositivo	Aspecto	Observación
Captación del agua de lluvia en improductivo	Características deseables	Aguas de buena calidad tras interactuar con el suelo (excluye terrenos de evaporación)
	Ventajas	Aprovechamiento en zonas con excedentes hídricos
		Adecuado en zonas urbanas
		Cartografía de improductivo (superficies asfaltadas)
	Desventajas	El agua se carga de contaminantes nocivos en áreas urbanas (HC, grasas...)
Aspectos Medioambientales	Problemas hidrológicos en avenidas punta	
Recarga accidental conducciones y alcantarillado	Características deseables	Recarga accidental en zonas urbanas
	Desventajas	Mosquitos y fauna no deseada
		Malos olores por agua estancada.
		Mantenimiento necesario de limpieza y vegetación.
		Problemas de colmatación
Aspectos Medioambientales	Escasa conciencia ciudadana para limpieza y no contaminación por vertidos	
Aspectos Medioambientales	Elemento que permite valorar las fugas de forma menos adversa	

X.1.8. SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUD's)

Tipo de dispositivo	Aspecto	Observación
Sistemas urbanos de drenaje sostenible	Características deseables	Elenco de elementos de gestión propios de zonas urbanas
	Ventajas	Aprovechamiento integral de las aguas en zonas urbanas
	Desventajas	Problemas en general de carácter hidrológico y cualitativo.
	Aspectos Medioambientales	Tipologías tan variadas que requieren estudios concretos

Fuente: (DINA-MAR 2010).

X.2. PARÁMETROS DE CALIDAD INDICADOS POR LAS NORMAS INTERNACIONALES PARA EL AGUA DE RECARGA

Parámetro		Unidad	Estados Unidos EPA, 2008 98 parámetros	Unión Europea UE, 1998 50 parámetros	Brasil CONAMA, 2005 70 parámetros	México NOM-127-SSA y NOM-014-CNA 110 parámetros
Microbiológicos (12)	Organismos coliformes totales	NMP/100 mL	5%	0	NE	Ausencia o no detectable
	Organismos coliformes fecales, E. Coli u organismos termotolerantes	NMP/100 mL	Ausencia o no detectable	0	NE	Ausencia o no detectable
	Enterococos	NMP/100 mL	NE	0	NE	0
	Legionella	NMP/100 mL	NE	NE	NE	0
	Giardia lamblia	Quistes	99.9% Remoción	NE	NE	0
	Cryptosporidium	Quistes	99% Remoción	0	NE	0
	Mycobacterium avium complex	NMP/100 mL	NE	NE	NE	0
	Aeromonas hydrophila	NMP/100 mL	NE	NE	NE	0
	Helicobacter pylori	NMP/100 mL	NE	NE	NE	0
	HPC	UFC/ mL	500	NE	NE	0
	Virus entéricos	UFC/100 mL	99.99% Remoción	NE	NE	0
	Clostridium perfringens	NMP/100 mL	NE	0	NE	NE
Organolépticos (2)	Color	Pt-Co	15	Agradable	Agradable	20
	Olor y sabor		3 UO	Agradable	Agradable	Agradable

Parámetro		Unidad	Estados Unidos EPA, 2008 98 parámetros	Unión Europea UE, 1998 50 parámetros	Brasil CONAMA, 2005 70 parámetros	México NOM-127-SSA y NOM-014-CNA 110 parámetros
Fertilizantes (1)	Ácido nitrilotriacético	µg/L	NE	NE	NE	NE
Fisicoquímicos (6)	Conductividad	(µS/cm a 20°C)	NE	2500	NE	NE
	pH		6.5-8.5	6.5 - 9.5	6.0-9.0	6.5-8.5
	SDT	mg/L	500	NE	500	1000
	Turbiedad	UTN	5	Agradable	NE	5
	Corrosividad	-	No corrosivo	NE	NE	NE
	Oxidabilidad	mg/L O ₂	NE	5	NE	NE
Inorgánicos (32)	Aluminio	mg/L	0.05 a 0.2	0.2	0.1	0.2
	Amonio	mg/L	NE	0.5	NE	NE
	Antimonio	mg/L	0.006	0.005	0.005	0.006
	Arsénico	mg/L	0.01	0.01	0.01	0.05
	Asbesto	MF/L	7	NE	NE	7
	Bario	mg/L	2	3	0.7	0.7
	Berilio	mg/L	0.004	NE	0.04	0.004
	Boro	mg/L	NE	1	0.5	0.3
	Cadmio	mg/L	0.005	0.005	0.001	0.005
	Cianuros (como CN ⁻)	mg/L	0.2	0.05	0.005	0.07
	Cloro residual libre	mg/L	NE	NE	0.01	0.2-1.50
	Cloruros (como Cl ⁻)	mg/L	250	250	250	250
	Cobre	mg/L	1.3	2	0.009	2
Cromo total	mg/L	0.1	0.05	0.05	0.05	

Parámetro	Unidad	Estados Unidos EPA, 2008 98 parámetros	Unión Europea UE, 1998 50 parámetros	Brasil CONAMA, 2005 70 parámetros	México NOM-127-SSA y NOM-014-CNA 110 parámetros	
Fierro	mg/L	0.3	0.2	0.3	0.3	
Fluoruros (como F ⁻)	mg/L	4	1.5	1.4	1.5	
Manganeso	mg/L	0.05	0.05	0.1	0.15	
Mercurio	mg/L	0.002	0.001	0.0002	0.001	
Molibdeno	mg/L	NE	NE	NE	NE	
Níquel	mg/L	NE	0.02	0.025	NE	
Nitratos (como N)	mg/L	10	11.30	10.00	10	
Nitritos (como N)	mg/L	1	0.15	1	1	
Nitrógeno amoniacal (como N)	mg/L	NE	NE	0.5	0.5	
Plata	mg/L	0.1	NE	0.01	0.1	
Plomo	mg/L	0.015	0.01	0.01	0.01	
Selenio	mg/L	0.05	0.01	0.01	0.05	
Sodio	mg/L	NE	200	NE	200	
Sulfatos (como SO ₄ ⁻²)	mg/L	250	250	250	400	
Sulfuros (como H ₂ S)	mg/L	NE	NE	0.002	NE	
Talio	mg/L	0.002	NE	NE	NE	
Yodo libre residual	mg/L	NE	NE	NE	0.2 - 0.5	
Zinc	mg/L	5	NE	0.18	5	
Orgánicos (56)	1,1 dicloroetileno	µg/L	7	NE	NE	7
	1,2-dibromoetano	µg/L	NE	NE	NE	NE
	1,2-diclorobenceno	µg/L	NE	NE	NE	NE
	1,2-dicloroetano	µg/L	5	3	10	5

Parámetro	Unidad	Estados Unidos EPA, 2008 98 parámetros	Unión Europea UE, 1998 50 parámetros	Brasil CONAMA, 2005 70 parámetros	México NOM-127-SSA y NOM-014-CNA 110 parámetros
1,2-dicloroetano	µg/L	NE	NE	NE	NE
1,4-diclorobenceno	µg/L	NE	NE	NE	NE
1,2-Dicloropropano (1,2 DCP)	µg/L	5	NE	NE	5
1,4-dioxano	µg/L	NE	NE	NE	NE
1,1,1-tricloroetano	µg/L	200	NE	NE	200
1,1,2-tricloroetano	µg/L	5	NE	NE	5
1,2,4-triclorobenceno	µg/L	70	NE	20	70
2,3,4,6-tetraclorofenol	µg/L	NE	NE	NE	NE
Acido nitrilo acético	µg/L	NE	NE	NE	NE
Acrilamida	µg/L	0.5	0.1	0.5	0.5
Benceno	µg/L	5	1	5	10
Benzopireno	µg/L	0.2	0.01	0.05	0.2
Bifenilos policlorados	µg/L	0.5	NE	0.001	0.5
Carbón Orgánico Total	mg/L	NE	Sin cambios anómalos	NE	<1
Cis-1,2-dicloroetileno	µg/L	70	NE	NE	70
Clorobenceno	µg/L	100	NE	NE	100
Cloruro de vinilo	µg/L	2	0.5	NE	2
Cloruro de cianógeno	µg/L	NE	NE	NE	NE
Di(2-etilhexil)adipato	µg/L	400	NE	NE	400
Di(2-etilhexil)ftalato	µg/L	6	NE	NE	6
Dibromuro de etileno	µg/L	0.05	NE	NE	NE

Parámetro	Unidad	Estados Unidos EPA, 2008 98 parámetros	Unión Europea UE, 1998 50 parámetros	Brasil CONAMA, 2005 70 parámetros	México NOM-127-SSA y NOM-014-CNA 110 parámetros
Dicloroacetato	µg/L	NE	NE	NE	NE
Diclorometano	µg/L	5	NE	20	5
Dioxin (2,3,7,8-TCDD)	µg/L	3.0E-05	NE	NE	0.000003
Dureza total (como CaCO ₃)	µg/L	NE	NE	NE	500000
EDTA	µg/L	NE	NE	NE	NE
Epiclorhidrina	µg/L	NE	0.1	NE	NE
Estireno	µg/L	100	NE	20	20
Etilbenceno	µg/L	700	NE	90	300
Fenoles o compuestos fenólicos	µg/L	NE	NE	3	300
Hexaclorobenceno	µg/L	1	NE	0.0065	1
Hexaclorobutadieno	µg/L	NE	NE	NE	50
Hexaclorociclopentadieno	µg/L	50	NE	NE	NE
Hidrocarburos policíclicos aromáticos	µg/L	NE	0.1	NE	NE
Metil terbutil éter	µg/L	NE	NE	NE	30
Microcystin-LR	µg/L	NE	NE	NE	NE
Monocloroacetato	µg/L	NE	NE	NE	NE
o-diclorobenceno	µg/L	600	NE	NE	600
p-diclorobenceno	µg/L	75	NE	NE	75
Pyriproxyfen	µg/L	NE	NE	NE	NE
SAAM	µg/L	500	NE	NE	500

Parámetro	Unidad	Estados Unidos EPA, 2008 98 parámetros	Unión Europea UE, 1998 50 parámetros	Brasil CONAMA, 2005 70 parámetros	México NOM-127-SSA y NOM-014-CNA 110 parámetros	
	Terbutilazina	µg/L	NE	NE	NE	NE
	Tetracloroetano	µg/L	NE	NE	10	NE
	Tetracloroetano y tricloroetano	µg/L	NE	10	30	NE
	Tetracloroetileno	µg/L	5	NE	NE	5
	Tetracloruro de carbono	µg/L	5	NE	2	5
	Tolueno	µg/L	1,000	NE	2	700
	Trans-1,2-dicloroetileno	µg/L	100	NE	NE	100
	Tricloroacetato	µg/L	NE	NE	NE	NE
	Tricloroetano	µg/L	NE	NE	NE	NE
	Tricloroetileno	µg/L	5	NE	NE	5
	Xileno (tres isómeros)	µg/L	10,000	NE	300	500
Plaguicidas (58)	1,2-Dibromo-3- cloropropano (DBCP)	µg/L	0.2	NE	NE	1
	1,3-Dicloropropeno	µg/L	NE	NE	NE	NE
	2,4 - D	µg/L	70	NE	4	30
	2,4-DB	µg/L	NE	NE	NE	NE
	2,4-Diclorofenol	µg/L	NE	NE	0.3	NE
	2,4,5-T	µg/L	NE	NE	2	NE
	2,4,5-TP (Silvex)	µg/L	50	NE	10	50
	Alaclor	µg/L	2	NE	20	20
	Aldicarb	µg/L	NE	NE	NE	10
	Aldrin y dieldrin	µg/L	NE	0.03	0.005	0.03

Parámetro	Unidad	Estados Unidos EPA, 2008 98 parámetros	Unión Europea UE, 1998 50 parámetros	Brasil CONAMA, 2005 70 parámetros	México NOM-127-SSA y NOM-014-CNA 110 parámetros
Atrazina	µg/L	3	NE	2	2
Azinfos-metil	µg/L	NE	NE	NE	NE
Carbofuran	µg/L	40	NE	NE	5
Cianazina	µg/L	NE	NE	NE	NE
Bendiocarb	µg/L	NE	NE	NE	NE
Borón	µg/L	NE	NE	NE	NE
Bromoxinil	µg/L	NE	NE	NE	NE
Carbaril	µg/L	NE	NE	0.02	NE
Clordano (total de isómeros)	µg/L	2	NE	0.04	0.2
Clorotoluron	µg/L	NE	NE	NE	NE
Clorpirifos	µg/L	NE	NE	NE	NE
Dalapon	µg/L	200	NE	NE	200
DDT (total de isómeros)	µg/L	NE	NE	0.002	1
Diazinón	µg/L	NE	NE	NE	NE
Dicamba	µg/L	NE	NE	NE	NE
Diclofop-Metil	µg/L	NE	NE	NE	NE
Diclorprop	µg/L	NE	NE	NE	NE
Dimetoato	µg/L	NE	NE	NE	NE
Dinoseb	µg/L	7	NE	NE	NE
Diquat	µg/L	20	NE	NE	20
Diuron	µg/L	NE	NE	NE	NE
Endothall	µg/L	100	NE	NE	100

Parámetro	Unidad	Estados Unidos EPA, 2008 98 parámetros	Unión Europea UE, 1998 50 parámetros	Brasil CONAMA, 2005 70 parámetros	México NOM-127-SSA y NOM-014-CNA 110 parámetros
Endrin	µg/L	2	NE	0.004	2
Fenoprop	µg/L	NE	NE	NE	NE
Forato	µg/L	NE	NE	NE	NE
Glifosato	µg/L	700	NE	65	700
Heptacloro y epóxido de heptacloro	µg/L	0.4 para heptacloro y 0.2 para el epóxido de heptacloro	0.03	0.01	0.03
Isoproturon	µg/L	NE	NE	NE	NE
Lindano	µg/L	0.2	NE	0.02	2
Malatión	µg/L	NE	NE	0.1	NE
MCPA	µg/L	NE	NE	NE	NE
Mecoprop	µg/L	NE	NE	NE	NE
Metolaclor	µg/L	NE	NE	10	NE
Metoxicloro	µg/L	40	NE	0.03	20
Metribuzina	µg/L	NE	NE	NE	NE
Oxamilo (vydate)	µg/L	200	NE	NE	200
Paraquat	µg/L	NE	NE	NE	NE
Paratión	µg/L	NE	NE	0.04	NE
Pendimetalina	µg/L	NE	NE	NE	NE
Pentaclorofenol	µg/L	1	NE	9	1
Permetrina	µg/L	NE	NE	NE	NE
Picloram	µg/L	500	NE	NE	500

Parámetro		Unidad	Estados Unidos EPA, 2008 98 parámetros	Unión Europea UE, 1998 50 parámetros	Brasil CONAMA, 2005 70 parámetros	México NOM-127-SSA y NOM-014-CNA 110 parámetros
	Simazina	µg/L	4	NE	2	4
	Terbufos	µg/L	NE	NE	NE	NE
	Toxafeno	µg/L	3	NE	0.01	3
	Trifluralin	µg/L	NE	NE	0.2	NE
	Plaguicidas	µg/L	NE	0.1	NE	NE
	Total de plaguicidas	µg/L	NE	0.5	NE	NE
Desinfectantes (3)	Monocloramina	mg/L	NE	NE	NE	NE
	Cloro	mg/L	4	NE	NE	NE
	Dióxido de cloro (ClO ₂)	mg/L	0.8	NE	NE	0
Subproductos de la desinfección (15)	2,4,6-triclorofenol	mg/L	NE	NE	0.01	NE
	Ácido dicloroacético	mg/L	NE	NE	NE	NE
	Ácidos haloacéticos	mg/L	0.06	NE	NE	0.06
	Ácido tricloroacético	mg/L	NE	NE	NE	NE
	Bromato	mg/L	0.01	0.01	NE	0.01
	Bromodiclorometano	mg/L	NE	NE	NE	NE
	Bromoformo	mg/L	NE	NE	NE	NE
	Cloraminas (como Cl ₂)	mg/L	4	NE	NE	0
	Clorato	mg/L	NE	NE	NE	NE
	Clorito	mg/L	1	NE	NE	1
	Cloroformo	mg/L	NE	NE	NE	NE
	Dibromoacetónitrilo	mg/L	NE	NE	NE	NE

Parámetro		Unidad	Estados Unidos EPA, 2008 98 parámetros	Unión Europea UE, 1998 50 parámetros	Brasil CONAMA, 2005 70 parámetros	México NOM-127-SSA y NOM-014-CNA 110 parámetros
	Dibromoclorometano	mg/L	NE	NE	NE	NE
	Dicloroacetoniitrilo	mg/L	NE	NE	NE	NE
	Trihalometanos totales	mg/L	0.08	0.1	NE	0.2
Radiactivos (11)	Radiactividad alfa global	Bq/L	NE	NE	NE	0.56
	Radiactividad beta global	Bq/L	NE	NE	NE	1.85
	Partículas alfa	pCi/L	15	NE	NE	NE
	Partículas beta y emisoros fotón	mrems/year	4	NE	NE	NE
	Dosis indicativa total	mSv/año	NE	0.1	NE	NE
	Tritio	Bq/L	NE	100	NE	NE
	Cesio	Bq/L	NE	NE	NE	NE
	Yodo	Bq/L	NE	NE	NE	NE
	Estroncio	Bq/L	NE	NE	NE	NE
	Radio 226 y 228 combinados	pCi/L	5	NE	NE	5
	Uranio	mg/L	0.03	NE	0.02	30

X.3. ARTÍCULOS DE DIVULGACIÓN



**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**



Reúso del agua del manantial de Cerro Colorado (Valle de Tula) para la recarga del acuífero del Valle de México

Informe final

Responsable: Dra. Blanca Elena Jiménez Cisneros

Participantes:

Dra. Alma Concepción Chávez Mejía

Dr. Francisco José Torner Morales

M. en C. Catalina Maya Rendón

Q. Abraham Chávez Velasco

Q.F.B. Emilia Soledad Lucario

Daniel Sánchez Segura

Rodolfo Salvador Delgadillo

Génesis Villegas Suárez

Kevin Giraldo

Marzo 2013

XI. TRABAJOS CITADOS

Castañeda Huizar, Porfirio, y Carmen Venegas Herrera. *eumed.net*. 08 de Enero de 2013. [http://www.eumed.net/libros-gratis/2010f/859/Distribucion%20del%20agua%20potable%20en%20la%20zona%20metro politana%20de%20Guadalajara.htm](http://www.eumed.net/libros-gratis/2010f/859/Distribucion%20del%20agua%20potable%20en%20la%20zona%20metro%20politana%20de%20Guadalajara.htm).

Llamas, Ramón, y Emilio Custodio. *Hidrología Subterránea*. Barcelona: Omega S.A., 1983.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. «Ley de Aguas Nacionales.» *Diario Oficial de la Federación*, 08 de Junio de 2012.

Comisión Nacional del Agua. *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea*. México, D.F.: Diario Oficial de la Federación, 2009.

—. *Agenda del Agua 2030*. México D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2011.

—. «Actualización de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México.» *Diario Oficial de la Federación*, 28 de Agosto de 2009.

—. *Estadísticas del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2009.

—. *Estadísticas del agua en México, edición 2011*. México D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2011.

Conselho Nacional Do Meio Ambiente. *RESOLUÇÃO CONAMA No. 396*. Brasilia: CONAMA, 2008.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Norma Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003, Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada*. México, D.F.: Diario Oficial de la Federación, 2009.

Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D. *www.sadm.gob.mx*. 08 de Enero de 2013. <http://www.sadm.gob.mx/PortalSadm/jsp/seccion.jsp?id=141>.

Shiklomanov, Igor. «World fresh water resources.» En *Water in crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*, de Peter H. Gleick. New York: Oxford University Press, 1993.

Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León. *www.sapal.gob.mx*. <http://www.sapal.gob.mx/agua-leon> (último acceso: 08 de Enero de 2013).

South Africa's Artificial Recharge Information Centre. "The Artificial Recharge Concept, Its Application And Potential." Somerset West, Sudáfrica, 2007.

UN International Network for Capacity Building in IWRM. *Groundwater Management in IWRM*. Pretoria, 2010.

Transparencia DF. *Transparencia* DF.
http://www.transparenciamedioambiente.df.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=132%3Aabastecimiento&catid=57%3Aimpactos-en-la-vida-cotidiana&Itemid=415.

Arreguín, Felipe, Víctor Alcocer Yamanaka, Humberto Marengo Mogollón, Claudia Cervantes Jaimes, Pedro Albornoz Góngora, y María Salinas Juárez. «Los Retos del Agua.» En *El Agua en México: Cauces y Encauces*, de Academia Mexicana de Ciencias. México, D.F.: Academia Mexicana de Ciencias, 2010.

British Geological Survey. *Impact of wastewater reuse on groundwater in the Mezquital valley, Hidalgo State, Mexico*. 1998.

DINA-MAR. *DINA-MAR. La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible. Desarrollo tecnológico*. Madrid: GRAFINAT, 2010.

Directiva Marco del Agua Unión Europea. «DIRECTIVA 98/83/CE DEL CONSEJO .» *Diario Oficial de las Comunidades Europeas* , 5 de 12 de 1998.

—. «DIRECTIVA 2006/118/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO.» *Diario Oficial de la Unión Europea*, 27 de 12 de 2006.

Dow FILMTEC. *NF-270 Product Sheet*. California.

EFE Asesores. *Procesamiento e Interpretación de los Niveles Piezométricos y de Calidad de Agua Del Acuífero del Valle de México* . México, D.F., 1995.

Environmental Protection Agency. *U.S. Government Printing Office*. 16 de Abril de 2013.
http://ecfr.gpoaccess.gov/cgi/t/text/text-idx?c=ecfr&tpl=/ecfrbrowse/Title40/40cfr144_main_02.tpl (último acceso: 18 de Abril de 2013).

Environmental Protection Agency U.S. *National Primary Drinking Water Regulations*. 05 de 2009. <http://www.epa.gov/safewater/consumer/pdf/mcl.pdf>.

Fuentes, M., y otros. *Estudio de la factibilidad de empleo del agua del acuífero del Valle del Mezquital para suministro del Valle de México*. México, D.F.: Instituto de Ingeniería, 1999.

Gale, Ian. *Strategies for Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas*. Paris: UNESCO International Hydrological Programme, 2005.

Instituto de Ingeniería UNAM. *Reúso del agua del manantial de Cerro Colorado para la recarga del acuífero del Valle de México* . México, D.F., 2013.

Jiménez, B., A. Chávez, R. Gibson, J. Becerril, C. Maya, y C. Hernández. *Trabajos de Asesoría Técnica Especializada para la Planeación y Ejecución de los Estudios, Proyectos, Servicios y Obras de Infraestructura Hidráulica Necesarios para los Proyectos de Abastecimiento Saneamiento del Valle de México*. México, D.F.: Instituto de Ingeniería UNAM, 2006.

Kaufman, Marc. *Life Found Deep Under Antarctic Ice for First Time*. 2 de 2013. <http://news.nationalgeographic.com/news/2013/02/130205-antarctica-ice-life-moons-science-environment-lakes/>.

National Research Council. *Ground Water Recharge Using Waters of Impaired Quality*. Washington, D.C.: National Academy Press, 1994.

Netherlands National Committee. *Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage*. Netherlands National Committee, 2003.

Page, D, y P Dillon. *Managed aquifer recharge case study risk assessments*. Melbourne: CSIRO: Water for a Healthy Country National Research Flagship, 2010.

Periódico Milenio. *Milenio*. 26 de Agosto de 2007. <http://www.milenio.com/cdb/doc/impreso/7109137> (último acceso: 16 de Enero de 2013).

Periódico Provincia. *Provincia*. 11 de Noviembre de 2012. <http://www.provincia.com.mx/2012/11/se-fuga-40-del-agua-enviada-al-df/> (último acceso: 16 de Enero de 2013).

ONU para la Alimentación y la Agricultura (FAO). *Aquastat*. 2013. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=es> (último acceso: 25 de 06 de 2013).

Organización de las Naciones Unidas. *Gestión Integrada de Recursos Hídricos*. 2009. <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/iwrm.shtml> (último acceso: 25 de 06 de 2013).

Organización Mundial de la Salud. *Guidelines for Drinking-water Quality, FOURTH EDITION*. 2011.

Ruíz, Rocío, y Gerardo Ruíz. *SOBREEXPLOTACIÓN Y ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL ACUÍFERO DE LA CIUDAD DE MÉXICO*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.