

3. Antecedentes

Se cometen muchos menos errores usando datos incorrectos que no empleando dato alguno.

Charles Babbage



El problema de escasez de agua a escala mundial ha originado la investigación y desarrollo en técnicas e instrumentación enfocadas principalmente a su reuso. En muchos casos estas técnicas han sido desarrolladas en países en los cuales la necesidad del recurso no es apremiante, como en Canadá y algunas zonas de los Estados Unidos, pero se ha tomado en cuenta su preservación. En las últimas décadas se han ejecutado medidas enfocadas a fomentar el reuso del agua y en consecuencia la preservación de los recursos naturales.

A continuación se describen las principales características de la recarga artificial e inducida.

3.1. Recarga artificial

El conjunto de técnicas que se han desarrollado para la reubicación del agua superficial que permiten inducir una recarga artificial, tienen el objetivo de eficientar la explotación de los acuíferos por un aumento del recurso y creación de reservas de agua subterránea, mediante una intervención directa o indirecta en el ciclo del agua¹.

Los métodos utilizados para llevar a cabo la recarga dependen de factores como: el terreno, subsuelo, tipo de agua, necesidades y condiciones socioeconómicas de la zona. Dentro de los principales objetivos de la recarga artificial están²:

- Mantener el recurso y regularizarlo.
- Restaurar un acuífero excesivamente explotado.
- Almacenar agua.
- Mejorar la calidad del agua que se recarga por residencia en el acuífero
- Combatir la intrusión marina y la contaminación, creando barreras hidráulicas apropiadas.
- Utilizar el acuífero como conducto de distribución.
- Disposición del agua residual.
- Diluir el agua del acuífero y contribuir a mantener un apropiado balance de sales, principalmente en zonas agrícolas.
- Reducir la subsidencia por exceso de bombeo.
- Mezclar agua de diferente calidad.
- Desalojar el exceso de agua pluvial de zonas urbanas (objetivo de éste trabajo).

¹ Custodio. P. 1967.

² ídem



3.1.1. Métodos de recarga

Antes de puntualizar sobre los métodos de recarga es necesario distinguir entre recarga inducida y recarga artificial. La primera consiste en crear situaciones favorables a la infiltración natural; los métodos utilizados consisten en preparar superficies de forma adecuada, como terrazas y trincheras; la extracción controlada en puntos favorables para lograr una mayor infiltración de agua al acuífero. Este tipo de recarga está limitada por la colmatación del subsuelo.

La recarga artificial consiste en el desarrollo de obras civiles, especialmente diseñadas para infiltrar el exceso de agua en puntos con características definidas; los métodos utilizados se distinguen en los siguientes sistemas:

- Recarga en superficie
- Recarga en profundidad
- Mixtos, compuestos por elementos de los dos sistemas

3.1.1.1. Recarga Superficial

La implementación de los métodos a continuación descritos depende en gran medida de las condiciones del medio circundante como son: tipo de suelo, espacio disponible, regímenes de escurrimiento, registros hidrometeorológicos, etc. Posteriormente se describirán cuáles son algunos de los estudios para conocer las condiciones bajo las cuales estará sujeto el proyecto.

- La recarga superficial consiste en crear una superficie de contacto, agua-terreno, para inducir más fácilmente el proceso de infiltración. Este método es de mayor factibilidad en el caso de acuíferos libres. Los factores más importantes a considerar son:
 - Capacidad de infiltración del terreno, cuanto menor es la capacidad de infiltración, mayor será el área requerida.
 - Calidad del agua de recarga.
 - Temperatura del agua. A mayor temperatura menor viscosidad y se favorece la infiltración.
 - Topografía del terreno
 - Geometría de la obra de recarga.

Con base a lo mencionado anteriormente, se han desarrollado diversos tipos de obras cuyo objetivo es infiltrar el agua artificialmente. A continuación se describen algunos sistemas de infiltración, así como sus rasgos y características que deben ser considerados y adaptados a las condiciones de las zonas piloto en México.



3.1.1.2. Recarga Superficial

3.1.1.2.1. Fosas

En acuíferos profundos de espesor considerable, formados por materiales no consolidados, es posible excavar grandes fosas, o bien utilizar aquellas que son el resultado de la extracción de materiales para la construcción, bancos de material, hacia las cuales se conduce el agua que se empleará para la recarga. La profundidad varía de acuerdo a las condiciones del terreno. Una ventaja de estas obras consiste en la posibilidad de almacenar grandes volúmenes de agua, producto de eventos extraordinarios de precipitación e infiltrarla, ver Figura 3.1.

Las paredes deben tener un talud que mantenga la estabilidad de la obra. Es recomendable colocar filtros de grava y arena en el fondo (0.2 - 2 m de espesor) que se limpia o renueva periódicamente para disminuir la colmatación en la capa subyacente.

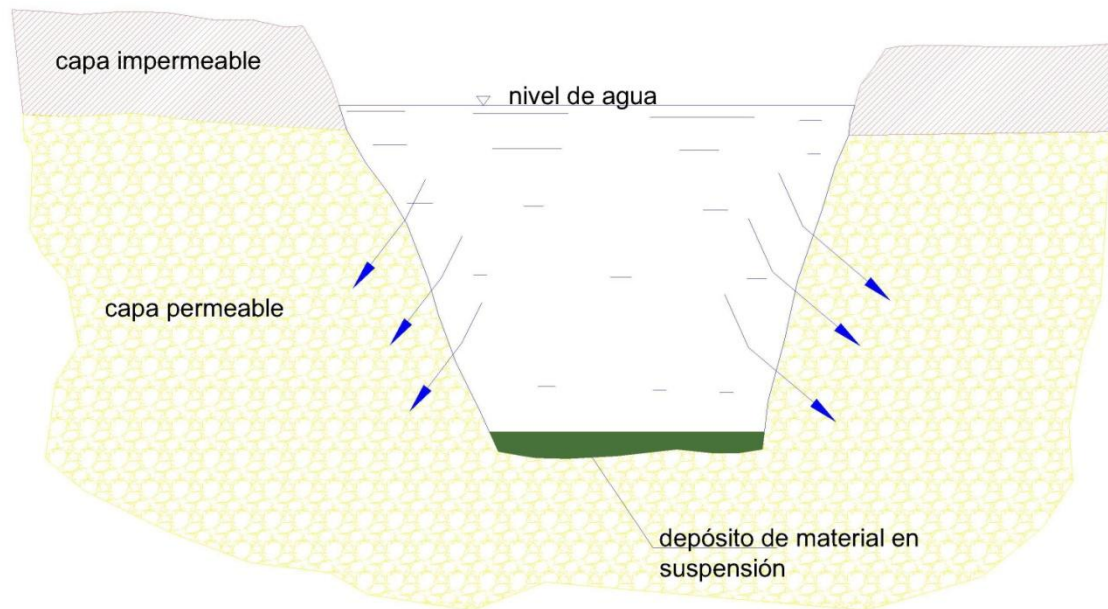
3.1.1.2.2. Trinchera de infiltración

Las trincheras de infiltración son excavaciones rellenas con agregados de diferentes características que sirven para crear un depósito artificial subterráneo³. El volumen de agua que llega a la trinchera se almacena temporalmente y se infiltra, contribuyendo a preservar el balance natural fomentando la recarga hacia los acuíferos.

³ Stormwater Technology Fact Sheet: Infiltration Trench. USEPA. Office of Water Washington, D.C.EPA 832-F-99-019 September - 1999



Figura 3.1 Fosa de recarga



Fuente: Elaboración propia

La experiencia indica que las trincheras no sólo favorecen la infiltración, también poseen la capacidad de remover y/o adsorber sustancias contaminantes en proporciones similares a las que tienen los sistemas de infiltración rápida, usados para el tratamiento de aguas residuales. Lo anterior dependerá del diseño y tipo de materiales utilizados en su construcción. En la Tabla 3.1 se muestra la eficiencia de remoción de algunos contaminantes⁴, la cual puede ser mejorada usando agregados limpios, adicionando materia orgánica, limos (loam) a la trinchera o instalando un geotextil.

Tabla 3.1 Capacidad de remoción de contaminantes de las trincheras

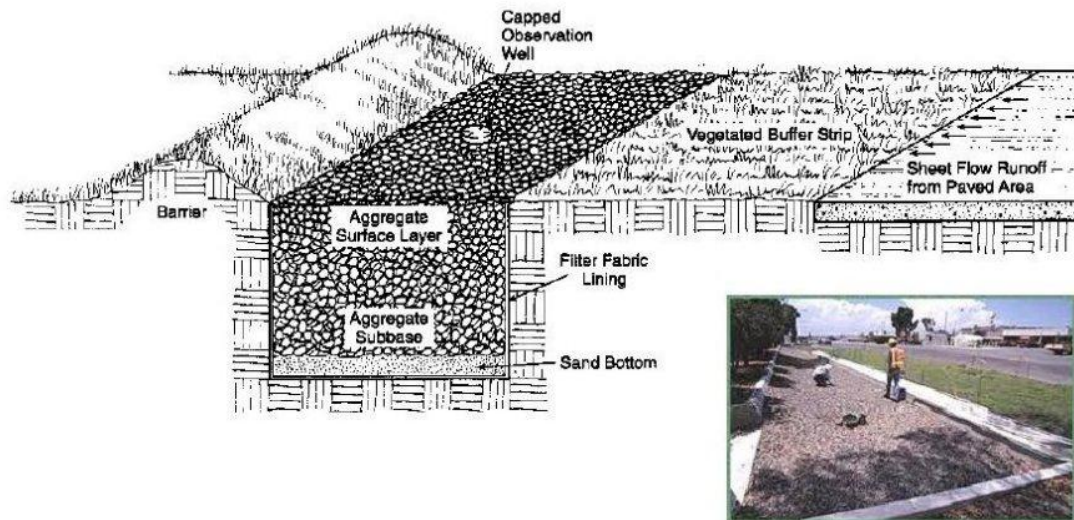
| Parámetro | Capacidad de remoción |
|-----------------------------|-----------------------|
| Sólidos suspendidos totales | 80% |
| Fósforo total | 60% |
| Nitrógeno total | 60% |
| Coliformes fecales | 90% |
| Metales pesados | 90% |

Fuente: USEPA

⁴ Fuente: Georgia Stormwater Management Manual, p. 3.2-77.



Figura 3.2 Trinchera de infiltración



Fuente: Georgia Stormwater Management Manual

En la bibliografía consultada se recomienda el uso de trincheras en zonas comerciales, residenciales y de oficinas con densidad de ocupación media a alta. No es recomendable situar este tipo de dispositivos en zonas industriales o cercanas a estas por el riesgo potencial de contaminación para el agua subterránea. El sitio donde se ubique este tipo de obra deberá tener una buena capacidad de infiltración.

En zonas urbanas, de manera recurrente, no se tienen las condiciones necesarias (capacidad de infiltración, área disponible, condiciones sanitarias, etc.) para desarrollar estos dispositivos. Por ésta razón se deben buscar sitios donde sea posible su instalación y llevar a cabo las obras necesarias para conducir el agua hasta ellos. Para este fin se propone el uso de parques, camellones, glorietas, etc.

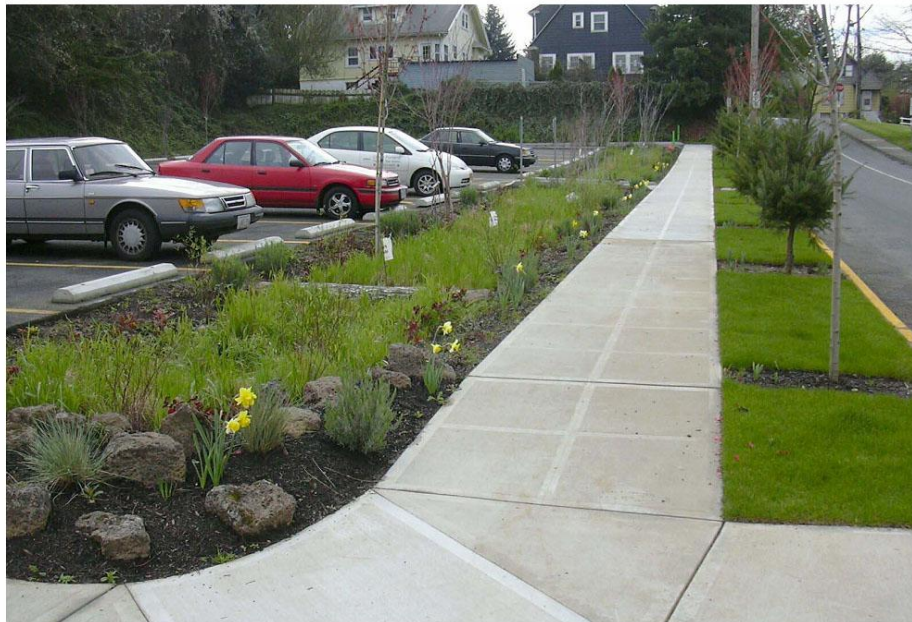
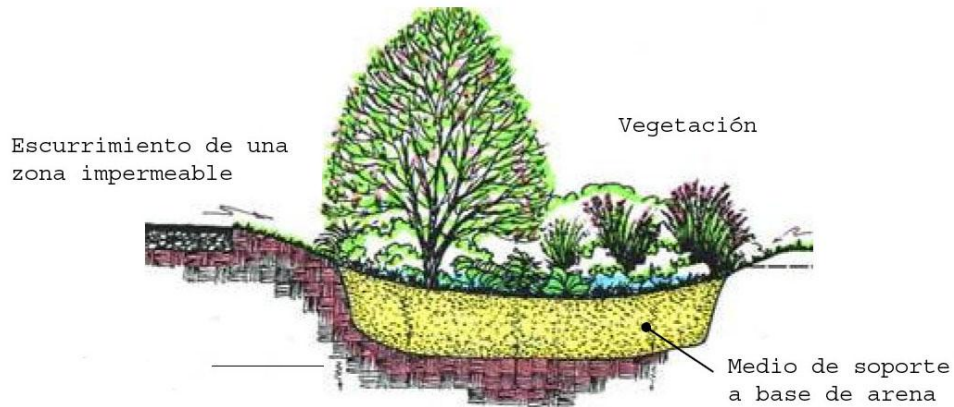
3.1.1.2.3. Áreas de Biorretención

Las áreas de biorretención son un tipo de dispositivo desarrollado a principios de los años 90 por el Departamento de Recursos Naturales del Condado Prince George, Maryland (PGDER por sus siglas en inglés). Su principio se basa en la utilización de sistemas biológicos para la transformación de nutrientes y sustancias contaminantes, por lo que ha sido usado en agricultura y en sistemas de tratamiento de agua residual. Éstas obras, de dimensiones considerables, se realizan en zonas bajas/deprimidas del terreno. Su diseño debe adaptarse a la superficie disponible, tipo de suelo y vegetación endémica.



Éste sistema emplea un modelo que trata de recrear un medio natural con vegetación, permitiendo la infiltración, filtración, almacenamiento y el mejoramiento de la calidad del agua mediante procesos físicos, biológicos y químicos.

Figura 3.3 Esquema conceptual de un área de biorretención



Fuente: Portland Stormwater Management Manual

3.1.1.3. Recarga profunda

Los sistemas de recarga a profundidad se aplican especialmente en zonas densamente pobladas, donde las características geológicas determinarán el tipo de obra. En ambientes donde predominan calizas y areniscas se emplea la recarga mediante pozos verticales. Mientras que en aluviones, arenas de



dunas y de playa, así como en terrenos volcánicos es posible aplicar cualquiera de los dos métodos⁵, superficial o profundo. Éste sistema se hace necesario cuando se tienen acuíferos donde se alternan capas permeables e impermeables, donde además de utilizar pozos verticales, es posible emplear pozos de drenes radiales y en menor medida galerías de infiltración⁶. Las características principales de estos sistemas son:

- Mayor costo de construcción y mantenimiento
- Necesidad de utilizar agua de mejor calidad para aminorar los problemas de colmatación, dado que la superficie de infiltración es menor y evitar la contaminación del agua subterránea.

La mayor ventaja de este sistema radica en el área necesaria para llevarse a cabo, lo cual es de suma importancia en zonas donde no hay disponibilidad de terreno.

3.2. Marco normativo

3.2.1. NOM-015-CONAGUA-2007

En México la política y gestión de los recursos hídricos se rigen por la Ley de Aguas Nacionales, que es el órgano que se encarga de regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr un desarrollo integral sustentable.

En la misma Ley se establecen las funciones de la Comisión Nacional del Agua, como autoridad en materia de la cantidad y la calidad de las aguas y su gestión en el territorio nacional y ejercer las atribuciones que le corresponden⁷. Dentro de las atribuciones de la comisión está el proponer Normas Oficiales Mexicanas.

La Comisión Nacional del Agua, en el año 2003 desarrolló un proyecto de Norma Oficial Mexicana para regir la infiltración artificial a los acuíferos, NOM-015-CONAGUA-2007. Los objetivos de esta Norma Oficial son

- Proteger la calidad del agua de los acuíferos.
- Aprovechar el agua pluvial y de escurrimientos para aumentar la disponibilidad de agua subterránea a través de la infiltración superficial.

⁵ Bourguet, 1971. Referido en Custodio.

⁶ Custodio, p. 1979.

⁷ Artículo 9. Capítulo III. Ley de Aguas Nacionales.



Cabe destacar que la aplicabilidad de esta Norma se ciñe a las obras que tengan capacidad de infiltración *mayor a 60 lps*; sin embargo aunque las obras no estén diseñadas para incorporar dicho volumen al acuífero, se deberá tomar ésta Norma como una guía para evitar contaminación del agua subterránea y garantizar el correcto funcionamiento de las obras de infiltración. De esta Norma se extraen los siguientes puntos.

5.1 En el caso de obras y actividades para la infiltración de aguas pluviales o de escurrimiento superficial al suelo se atenderá lo siguiente:

5.1.1 Las obras y actividades a que se refiere ésta Norma, deberán en todo momento respetar lo dispuesto por las declaratorias de áreas naturales protegidas y sus programas de manejo.

5.1.2 El suelo deberá estar caracterizado conforme a lo dispuesto por la Norma ISO 15175:2004 Calidad del suelo. Caracterización del suelo en relación con la prospección del agua subterránea; la que la sustituya, o la NMX correspondiente.

5.1.3 En áreas propensas a deslaves o con pendientes abruptas e inestables, sólo podrán llevarse a cabo las obras y actividades a que se refiere la presente, cuando se hayan realizado obras de ingeniería para estabilizar el terreno.

5.1.4 En terrenos que hubieran sufrido algún evento de contaminación, quien realice la obra deberá asegurarse que no está inscrito como predio contaminado.

5.1.4.1 Se considerará que existió un evento contaminante y que éste ha sido remediado de conformidad con lo establecido en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos y su Reglamento así como las normas oficiales mexicanas correspondientes.

5.1.4.2 La disposición de aguas al suelo y a la zona no saturada, no debe afectar captaciones de agua subterránea o a obras civiles de terceros.

5.1.4.3 No se podrá realizar la disposición al suelo o subsuelo de aguas residuales crudas, o la mezcla de éstas con aguas



pluviales o de escurrimiento superficial, salvo cuando se cumpla la NOM-014-CONAGUA-2007.

5.1.4.4 Se podrá llevar a cabo la disposición de aguas a que se refiere la presente, previendo que se tenga una limpieza de basura de la zona.

5.2 En el caso de la disposición de aguas pluviales o de escurrimiento superficial a la zona saturada, se aplicarán las siguientes:

5.2.1 Se deberán observar las especificaciones establecidas en el numeral 6.2 de la Norma Oficial Mexicana NOM-003-CONAGUA-1996, Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua, para prevenir la contaminación de acuíferos.

5.2.2 La infiltración no deberá afectar la calidad del agua nativa. Para el muestreo del agua nativa se utilizará la Norma ISO/CD 5667-11-2006 Calidad del agua.

Parte 11. Guía para el muestreo de aguas subterráneas, la que la sustituya o la NMX correspondiente.

5.2.3 Las obras de disposición de aguas al subsuelo mediante pozos de infiltración, deben contar con un sistema de tratamiento que garantice que el agua en el punto de infiltración, tendrá los límites establecidos en la tabla siguiente.

| Contaminante | Unidad de medida | Límite | Método de prueba⁸ |
|-----------------------------|-------------------------|---------------|-------------------------------------|
| Grasas y aceites | mg/l | 15 | NMX-AA-005-SCFI-2000 |
| Materia flotante | mg/l | 0 | NMX-AA-006-SCFI-2000 |
| Sólidos sedimentables | mg/l | 2 | NMA-004-SCFI-2000 |
| Sólidos suspendidos totales | mg/l | 150 | NMX-AA-034-SCFI-2001 |
| Nitrógeno total | mg/l | 40 | NMX-026-SCFI-2001 |
| Fósforo | mg/l | 20 | NMX-029-SCFI-2001 |
| Coliformes fecales | NMP/100 ml | No detectable | NMX-AA-042-1987 |

⁸ En términos del artículo 49 de la Ley Federal Sobre Metrología y Normalización se podrán utilizar otros métodos de prueba o los señalados en las normas mexicanas enunciadas.



5.2.4 Las pruebas a que se refiere la tabla anterior se deberán aplicar al sistema de tratamiento antes de su operación.

5.2.4.1 Un laboratorio acreditado deberá emitir los informes correspondientes.

5.2.4.2 Se deberá incorporar en el pozo un instrumento de muestreo y prueba con la norma ISO 15839:2003 Water quality On-line sensors/analysing equipment for water Specifications and performance tests, la que sustituya o la NMX correspondiente.

5.2.4.3 Los resultados de pruebas realizadas con el instrumento señalado en el numeral anterior podrán ser requeridas por la autoridad en las visitas de inspección.

5.2.5 La distancia mínima entre el fondo y la superficie freática será de cinco metros.

En la misma NOM se establecen las actividades que se deben llevar a cabo para monitorear el funcionamiento del sistema, las acciones necesarias para su mantenimiento o abandono.

3.2.2. Normatividad Asociada

A continuación se resumen los puntos más relevantes, relacionados al diseño de sistemas de infiltración y su aplicabilidad, contenidos en Normas y Leyes referidas en la NOM-015-CONAGUA-2007.

3.2.2.1. NOM-003-CONAGUA-1996

Cómo anteriormente se mencionó, la ubicación de los dispositivos de infiltración debe cumplir con los mismos que una obra para extracción de agua subterránea. En el apartado 6.2 de la NOM-03-CONAGUA-1993, se establecen las áreas restringidas para el emplazamiento de pozos. A continuación se cita lo contenido en dicho apartado.

El área de protección entre el sitio seleccionado para construir un pozo y las fuentes potenciales de contaminación existentes que no pueden ser suprimidas, tendrá un radio mínimo de 30 m con respecto al pozo. Las fuentes de contaminación son las siguientes (esta lista no es limitativa, sino que depende de lo que, para situaciones y condiciones particulares, la Comisión considere necesarias):



- Alcantarillado sanitario
- Campos de percolación
- Canales de aguas residuales
- Cloacas
- Depósitos de jales
- Fosas sépticas
- Gasolineras y depósitos de hidrocarburos
- Lechos de absorción
- Letrinas
- Pozos abandonados no sellados
- Pozos de absorción
- Puntos de descarga de aguas residuales de uso industrial
- Rellenos sanitarios
- Ríos y cauces con aguas residuales provenientes de los usos definidos en los puntos 4.31 a 4.39
- Rastros y establos

El radio mínimo podrá ser modificado por la Comisión o por la autoridad local competente, a través de la disposición legal o reglamentaria aplicable, con base en un estudio específico del sitio que considere la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación y la extensión de su área de influencia, para diferentes tiempos.

Cuando no sea posible cumplir el radio mínimo especificado en la presente Norma o en la disposición local reglamentaria, el concesionario o asignatario deberá presentar a la Comisión el diseño que propone, para evitar la contaminación del acuífero, basado en estudios hidrogeológicos.

3.3. Experiencia Previa

En México se cuenta con alguna experiencia en el manejo de agua de lluvia mediante obras para infiltración, asociada más a las necesidades propias y urgentes de un sitio que sufre de encharcamientos recurrentes, que a una planeación integral donde las obras de infiltración sean un método recurrente de apoyo a los sistemas de desalojo de agua pluvial.

3.3.1. Infiltración de agua pluvial: Jardines del Pedregal

La colonia Jardines del Pedregal, emplazada sobre derrames basálticos, es una de las zonas geotécnicas más favorables para el desarrollo de edificaciones en la Ciudad de México, debido a que el tipo de suelo reduce los



costos en cimentaciones. Sin embargo, éste medio hace costosa la construcción de un sistema de drenaje pluvial.

En esta zona, es común encontrar partes de las vías de tránsito que presentan depresiones las cuales en temporada de lluvias propician la formación de grandes encharcamientos que impiden la circulación de los vehículos por varias horas. En ocasiones estos encharcamientos provocan pérdidas materiales, ya que los automóviles quedan varados y en el peor de los casos quedan sumergidos. Es por ello que se volvió una necesidad en esta zona el encontrar una solución práctica y rápida a esta problemática.

Las rocas basálticas presentan un grado de fracturamiento tal, que propicia una buena capacidad de infiltración, que permite el desalojo de grandes volúmenes de agua en tiempos relativamente cortos. La solución fue relativamente sencilla, en las depresiones de los arroyos viales donde eran frecuentes los encharcamientos, se excavaron fosas que sirven como dispositivos de infiltración, las únicas protecciones que tienen son rejillas, que impiden el paso de material sólido: hojas, ramas, botellas, etc. Como resultado de la construcción de estos dispositivos, disminuyó la frecuencia y magnitud de los encharcamientos. Por otra parte la obra no afecta la armonía estética del medio.

3.3.2. Infiltración de agua residual tratada: Caso Lesser

El proyecto que se presenta a continuación no se apega totalmente al tema que aborda ésta tesis, infiltración de agua de lluvia, sin embargo sienta un precedente en cuanto a infiltración artificial en México, y es por ello que se escogió un proyecto, que puede aportar información importante para cualquier proyecto con objetivos similares.

Durante la década de los años noventa, la Ciudad de México requería de grandes volúmenes de agua, obtenidos por medio de la importación de agua de otras cuencas o con pozos profundos. La extracción excesiva propició que se sobrepasara la recarga natural del sistema acuífero, causando abatimientos de los niveles de agua, que en dicha década alcanzaban 3 metros por año en algunas zonas, originando también problemas como la compactación del subsuelo y hundimientos del terreno que a su vez, provocan problemas en los sistemas de drenaje de la ciudad.



Para lograr atenuar los efectos de la extracción intensiva de agua y utilizar el acuífero como una zona de almacenamiento de agua para uso futuro, se propuso hacer la recarga de manera artificial.

Las primeras acciones de este proyecto estuvieron encaminadas a definir cuáles son las zonas más propicias, debido a sus características geológicas, para implementar un sistema de recarga artificial. A continuación se describe brevemente cuáles fueron las zonas más favorables para los fines de dicho proyecto.

- Sierra Chichinautzin y Sierra de Santa Catarina, donde las rocas predominantes son basaltos, que presentan una alta permeabilidad debido a su fracturamiento, y material piroclástico, que por su alta permeabilidad permiten la infiltración mediante pozos y sistemas en superficie, con tasas de recarga de hasta 80 lps y 700 lps respectivamente.
- Sierra de las Cruces, donde la Formación Tarango que aflora al pie de dicha sierra, presenta material granular que le otorga una permeabilidad considerada como media, donde es posible infiltrar alrededor de 20 lps por pozo.
- Dentro de la Ciudad de México, existen zonas con materiales granulares que permiten una tasa de infiltración de 10-30 lps por pozo y hacia el Valle de Texcoco se presentan permeabilidades de medias a bajas, donde se podrían recargar de 5-10 lps por pozo.

En ese entonces, la Zona Metropolitana de la Ciudad de México utilizaba alrededor de $61.5 \text{ m}^3/\text{s}$, de los cuales sólo un mínimo porcentaje de ésta se trataba y era usada para riego de áreas verdes, industrias y llenado de canales y cuerpos de agua como el sistema de canales de Xochimilco, de manera que existía un remanente de agua residual.

De las 23 plantas de tratamiento de agua residual, se eligieron 7 plantas donde sería necesario construir un pozo de recarga por cada una de ellas, en algunos casos no fue necesaria la perforación de un pozo, ya que se encontraban cerca de pozos de extracción fuera de servicio.

En cuanto a la calidad del agua tratada para la recarga, las plantas deberían mejorar la eficiencia de tratamiento mediante procesos adicionales.



Por otro lado, la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) construyó una laguna para la infiltración de aguas tratadas sobre el flanco sur de la Sierra de Santa Catarina, donde se obtuvieron gastos de recarga alrededor de 700 lps a través de una superficie de 6 hectáreas.

Figura 3.4 Ubicación de pozos de recarga de agua tratada.



Fuente: Modificado de Lesser, 1991