

28  
2-9'



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**RECARGA ARTIFICIAL DE ACUIFEROS**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

**INGENIERA PETROLERA**

**P R E S E N T A :**

**DALIA PEREZ GONZALEZ**



MEXICO, D. F.

1991

**FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

Todo el material contenido en esta tesis está 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.

## INDICE

### RECARGA ARTIFICIAL DE ACUIFEROS

	PAGS	
<b>CAPITULO I</b>	<b>INTRODUCCION</b>	
I.1	Antecedentes .....	5
I.2	Objetivos .....	8
I.3	Metodología .....	11
I.4	Contenido .....	12
<b>CAPITULO II</b>	<b>RECARGAS NATURAL E INDUCIDA</b>	
II.1	Proceso de Recarga Natural de los Acuíferos	17
II.2	Movimiento Horizontal y Vertical .....	22
II.3	Fuentes de Agua para la Recarga .....	34
II.4	Recarga Inducida .....	36
II.5	Recarga Artificial .....	38
<b>CAPITULO III</b>	<b>METODOS DE RECARGA ARTIFICIAL</b>	
III.1	Recarga desde la Superficie .....	46
III.2	Recarga en Profundidad .....	54
III.3	Pozos de Recarga .....	57
III.4	Sistemas Mixtos de Recarga .....	60
<b>CAPITULO IV</b>	<b>BENEFICIOS Y DAÑOS</b>	
IV.1	Calidad y Concentración del Agua de Recarga	64
IV.2	Colmatación .....	67
<b>CAPITULO V</b>	<b>REGIONALIZACION DE LOS EFECTOS</b>	
V.1	Efectos Elásticos y Plásticos .....	72
V.2	Velocidad de Propagación .....	75
V.3	Homogeneidad e Isotropía .....	78

**CAPITULO VI**

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

..... 80

**REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA**

..... 82

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

Una de las formas utilizadas para lograr la explotación racional de un acuífero aprovechado, coordinándolo con los demás elementos que determinan el régimen hidrológico de una cuenca, es la recarga artificial, cuando ésta sustituye las deficiencias que tiene.

Consiste en la intervención en los procesos de recarga de un acuífero, en los puntos y periodos más convenientes a su régimen de explotación. Se requiere que el terreno tenga zonas porosas y vacías que no se drenen rápidamente al exterior y que almacenen convenientemente el agua. La existencia de medios porosos de esta naturaleza no suele existir naturalmente en áreas húmedas y templadas, y únicamente se encuentran en zonas áridas; cuando todo está lleno de agua solo se puede tratar de desplazar unas aguas por otras o producir mezclas apropiadas. En cambio, en acuíferos explotados, se pueden producir descensos de nivel que dejan un volumen vacío para ser recargado; en este caso es esencial la existencia de un bombeo apropiado a la recarga, y dicha recarga debe realizarse de modo que no se impida o disminuya la recarga natural o lo que pudiera inducirse de aguas superficiales o de otros acuíferos.

El almacenamiento del agua en el subsuelo tiene la gran ventaja de que no utiliza la superficie del terreno y evita totalmente o en parte las pérdidas por evaporación.

En cierto modo la creación de situaciones favorables para la infiltración de aguas superficiales *-recarga inducida-*, por ejemplo por bombeo cerca de un río, es también una forma de recarga artificial, si se realiza expresamente con ese fin. También lo es el riego con fuerte exceso de agua, a fin de infiltrar los excedentes no utilizados por las plantas.

Los *objetivos generales* más comunes son:

- 1.- Restaurar un acuífero excesivamente explotado, quizás prolongando su vida útil.
- 2.- Mantener los recursos y racionarlos para el estiaje.
- 3.- Almacenar agua local o importada.
- 4.- Depurar el agua que se recarga por estancia prolongada en el acuífero.
- 5.- Combatir la intrusión y la contaminación, creando barreras hidráulicas apropiadas.
- 6.- Utilizar el acuífero como conducto de distribución de nuevas aguas, cuando ya existe una red apropiada de pozos.
- 7.- Evacuar ciertas aguas residuales, principalmente aguas de refrigeración.
- 8.- Diluir las aguas existentes en el acuífero y ayudar a mantener un apropiado balance de sales, principalmente en zonas agrícolas.
- 9.- Reducir el hundimiento del terreno por exceso de bombeo.
- 10.- Mezclar agua de diferentes calidades.

En general, la recarga artificial tiene muchas ventajas para el acuífero, pero este proceso también trae consigo desventajas que es necesario conocer para evitar el perjuicio que se le puede provocar al acuífero por su uso inadecuado. El presente trabajo es el resultado de un análisis sistemático de la información disponible y pretende ordenar las ideas al respecto para su mejor aplicación en un acuífero en explotación.

## I.1 ANTECEDENTES

Posiblemente en la antigüedad, en especial en zonas áridas, ya se practicó alguna forma de recarga artificial, principalmente corrigiendo la pendiente del terreno o represando cauces de ríos. Así se cita que los romanos efectuaron terrazas en las laderas de los valles y represas en el Norte de África. Se sabe que se realiza desde hace siglos en los ríos del Oeste Sahariano y en las áridas islas occidentales de Las Canarias, donde éstas represas reciben el nombre de "gavias". (En México, gaviones)

Desde un punto de vista moderno, la recarga artificial no se inició sino hasta finales del siglo XIX, efectuándose la primera obra europea en Goteburgo (Suecia en 1897), aunque anteriormente Thiem ya había ideado un sistema similar para la ciudad alemana de Essen en 1888. El método de recarga en depósitos y zanjas pronto se extendió por toda Europa.

En cuanto a Norteamérica, en California se iniciaron los trabajos de recarga por extensión en 1896 y por fugas de canales de riego en 1898 (ciudad de Fresno, hasta 250 lps). En 1903 se inició la inyección profunda con pozos.

La recarga de una forma o de otra, continua, intermitente, u ocasionalmente, se realiza en muchos países.

En el Valle de México, la extracción del agua subterránea ha provocado la sobreexplotación de algunos acuíferos, ya que la recarga es bastante menor que la extracción; debido a esto, ha surgido la necesidad de aprovechar las aguas residuales que se originan en el valle. La recarga de acuíferos con aguas residuales tratadas se considera como uno de los métodos más atractivos, dependiendo de la recarga para el fin que se requiera el agua, de la disponibilidad de superficies y de las características del subsuelo donde se infiltrará.

La cuenca del Valle de México, con una superficie de 9 600 km<sup>2</sup>, tiene una precipitación media anual de 700 mm, equivalente a un gasto de 213 m<sup>3</sup>/s y una evapotranspiración potencial media anual de 600 mm, que corresponden a 181.4 m<sup>3</sup>/s. Por otro lado, la recarga por infiltración representa 27 m<sup>3</sup>/s, es decir, casi el 100 % del agua que moja la superficie del terreno, (CIEPSCS, 1984).

En estas condiciones y por la necesidad de satisfacer las demandas de la gran metrópoli, se considera poco factible suspender a corto plazo la extracción de agua subterránea, por lo que las acciones para incrementar la infiltración o la aplicación de recarga artificial son las únicas opciones para aumentar los volúmenes de agua subterránea en el Valle de México y reducir el desequilibrio geohidrológico existente.

La recarga artificial de los acuíferos es uno de los métodos más atractivos, cuya finalidad contempla tres objetivos básicos:

- *Almacenamiento y Control:*

Permite aumentar la disponibilidad de las aguas subterráneas, reducir el desequilibrio existente en las zonas con deficiencias por sobreexplotación y funciona como barrera hidráulica para impedir el paso de aguas contaminadas o salinas hacia los acuíferos de mejor calidad.

- *Tratamiento:*

El flujo lento de una corriente a través de un medio permeable produce una variedad de procesos físicos, químicos y biológicos como infiltración, absorción, nitrificación, desnitrificación, intercambio iónico y reacción de virus y bacterias, lo que mejora la calidad del agua, dependiendo de las características hidrogeológicas y químicas del suelo y de la calidad del agua incorporada.

- *Dilución:*

Agua de mejor calidad se mezcla con otra de calidad inferior, a fin de obtener características que satisfagan un uso específico del producto.



En México, los primeros intentos de recarga de acuíferos se realizaron en los años cincuenta, al construirse tres pozos en la Presa Mixcoac en el D.F., a fin de infiltrar los escurrimientos en la época de lluvias. Sin embargo, por tratarse de escurrimientos torrenciales, continuamente se azolvaban, por lo que requerían de un intenso mantenimiento y limpieza (Murillo y Piñón, 1985).

La Comisión del Lago de Texcoco (CLT) inició a mediados de 1985 un proyecto denominado *Módulo experimental de recarga de acuíferos*, tendiente a definir la factibilidad técnica y económica de recargar artificialmente los acuíferos con agua residual tratada a nivel terciario.

Actualmente dicha Comisión cuenta con una capacidad instalada para tratar a nivel secundario  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$  de aguas residuales del Río Churubusco, por lo que existen volúmenes de aguas residuales susceptibles de aprovecharse en actividades agrícolas o industriales, o bien, para su infiltración en los acuíferos mediante el tratamiento previo requerido en cada caso.

En la actualidad el DDF tiene un campo experimental en la delegación Xochimilco para investigar la factibilidad técnica de incrementar la recarga en los acuíferos basálticos del sur de la Ciudad de México.

Se puede mencionar que de una forma indirecta, en esa parte sur del valle, se induce una recarga en los basaltos a través de los pozos de absorción del drenaje domiciliario, cuyo efecto ya se ha observado en el acuífero granular. También en la Región Lagunera se están haciendo estudios para inducir recarga artificial al acuífero y en general, algunas presas que pierdan agua por filtraciones, en realidad recargan artificialmente a los acuíferos en contacto con ellas.

## 1.2 OBJETIVOS

Los acuíferos pueden tener diversas funciones en el programa de ordenación hidráulica de una cuenca, según sus propias características y las de la cuenca en que están integradas.

Los objetivos de la recarga artificial se ajustarán a las características funcionales del embalse. Algunos de estos objetivos se enumeran a continuación:

### 1.- *Utilización del acuífero como embalse regulador y como depósito.*

Este es el caso de embalses subterráneos de gran volumen, en lugares donde se disponga de periodos con excedentes de aguas superficiales que de otra manera se desperdiciarían.

### 2.- *Utilización del acuífero como red de distribución.*

Cuando el acuífero tiene un volumen y espesor grande, la recarga puede ser estacional, ya que puede admitir una oscilación fuerte de nivel, pero si el acuífero tiene un volumen pequeño en relación con la explotación de que es objeto, habrá que recargarlo de forma casi permanente con agua previamente regulada, en cuyo caso el acuífero actúa como una red de distribución de dichas aguas si su transmisividad es suficiente. Se logra mantener los niveles evitando la afectación de pozos existentes, y lograr un bombeo total mayor que el que permitirían los recursos naturales del acuífero.

### 3.- *Corrección de una disminución de la recarga existente.*

La recarga natural puede reducirse por traslado de aguas de una cuenca a otra o por desvío de un río en una zona. La recarga artificial puede tratar de corregir las afectaciones que se deriven. Otras causas de disminución de la recarga son la urbanización, la supresión de regadíos con agua procedente de otros lugares, la instalación de una red de saneamiento que evite que las aguas usadas vuelvan al acuífero, etc.

4.- *Utilización del acuífero como filtro y elemento de tratamiento de agua.*

Es quizás uno de los objetivos más usuales de la recarga artificial empleado en Europa, América, Asia y otras partes del mundo, obteniéndose buenos resultados.

5.- *Defensa del propio acuífero.*

Dos casos son los típicos de este objetivo, las barreras contra la intrusión salina y la recarga para evitar el hundimiento del terreno.

6.- *Eliminación de vertidos indeseables.*

Este es el caso de inyección en acuíferos profundos que no son utilizables para abastecimiento.

También se utiliza para recuperar aguas procedentes de refrigeración industrial y urbana; hay que utilizar el método con reservas, pues ello puede provocar el aumento de la temperatura del agua del acuífero en varios grados, contribuyendo a formar colonias bacterianas, algas, etc.

7.- *Reducir o eliminar el descenso del nivel del agua subterránea producido por bombeo.*

Cuando una zona se encuentra sometida a una importante explotación agrícola, esto genera un descenso del nivel piezométrico. Esto por consiguiente aumenta el costo de extracción y/o una considerable dificultad de mantenimiento en el caudal de explotación.

Este efecto se puede disminuir mediante actuaciones en el cauce del río (serpenteos y represas) y un sistema de depósitos fuera del mismo. Con estos sistemas se ha conseguido implementar la infiltración natural, reduciendo el descenso del nivel del agua subterránea.

- Entre los principales logros obtenidos se tienen:
- Una recuperación de las captaciones existentes.
  - Reducción del costo de extracción
  - Un mantenimiento, y en determinados casos, un aumento de los caudales de extracción.

8.- Evitar que las aguas de inferior calidad existentes en el acuífero o que se producen por contaminación, se desplacen hacia las captaciones de buena calidad.

En la siguiente figura se presenta una recarga mediante una barrera de inyección, que consigue la creación de un umbral en la superficie del agua, que detiene el flujo contaminado, evitando que el mismo llegue a la zona de explotación.

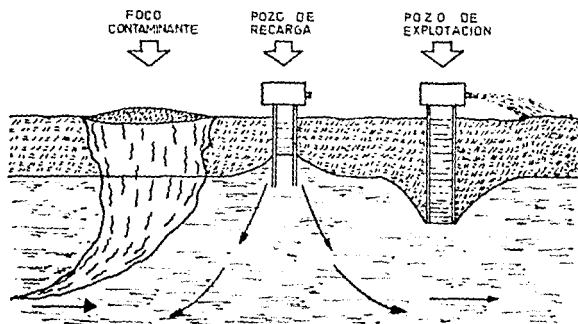


Fig. 1.2.1

9.- Evacuación y depuración de aguas residuales urbanas, en las que tras de realizar previamente un cierto tratamiento, se complementaria con el autodepurador del terreno.

Entre los principales logros que se pueden obtener utilizando esta forma de recarga son:

- Aprovechamiento del agua residual, fundamentalmente en regadíos. El agua es un bien escaso, y en algunas zonas muy escaso, y no debe eliminarse ninguna agua residual sin conocer perfectamente si puede ser útil a algún uso.
- Ecológico, eliminación de estas aguas que iban a ser vertidas a ríos o al mar.
- Depuración de las mismas, gracias al poder autodepurante de la zona no saturada.
- Elevación del nivel piezométrico y en consecuencia, aumento de los recursos hídricos.

### 1.3 METODOLOGIA

La realización de este trabajo surge como una inquietud de poder analizar la Recarga Artificial en los acuíferos como una alternativa de solución a problemas de contaminación de acuíferos y sobreexplotación de los mismos.

Para llevar a cabo esta tarea se han hecho investigaciones bibliográficas; revisando desde el ciclo hidrológico del agua en sus componentes principales, hasta el comportamiento del material que forma el acuífero, su plasticidad, elasticidad y mecanismos para aportar y retener el agua filtrada.

Se han revisado artículos de ingeniería especializados sobre temas de hidráulica.

También, se han llevado a cabo discusiones de algunos temas en la materia de Exploración y Evaluación de Agua Subterránea, impartida en el semestre 91-I donde se obtuvo información sobre como evaluar cada concepto de la ecuación de balance de materia, para determinar la cantidad de agua aportada o pérdida al acuífero de cada concepto de la ecuación.

En general este trabajo es una recopilación de información para enfocarla al proceso específico de Recarga Artificial. No pretendo hacer un tratado sobre esta materia, pues el objetivo es dar cumplimiento a un requisito de tesis para obtener el grado y principalmente el de iniciar una serie de investigaciones acerca de temas relacionados con la Geohidrología.

#### 1.4 CONTENIDO

### RECARGA ARTIFICIAL DE ACUIFEROS

#### CAPITULO I. INTRODUCCION

En este capítulo se pretende dar al lector un panorama general de lo que es y significa la recarga artificial. Es necesario hablar de antecedentes tanto mundiales como de nuestro país principalmente, e indicar los trabajos que se han realizado respecto a este tema.

Se establecen algunos objetivos que debe cumplir la recarga para poder ser un método adecuado y usarlo. Además se da una breve explicación de la manera en la que se desarrolló este trabajo.

## CAPÍTULO II. RECARGA NATURAL E INDUCIDA

Dentro de las formas de recargar un acuífero se encuentran: la manera natural, que es la infiltración del agua de lluvia, ríos, etc, y que obedece principalmente el ciclo hidrológico natural del agua. La otra forma es la ampliación de zonas o superficies de infiltración por medio del riego o alguna manera indirecta donde interviene la mano del hombre.

Se explica el movimiento que tiene el agua al infiltrarse, analizándola desde dos puntos de vista (horizontal y vertical), para hacer más simple su estudio. Se define lo que es recarga artificial y cuales son sus principales objetivos.

## CAPÍTULO III. METODOS DE RECARGA ARTIFICIAL

Este capítulo entra de lleno al tema de Recarga Artificial, previamente definida; se enfoca a los métodos existentes para llevarla a cabo y a sus combinaciones de métodos. En esta sección se indican las técnicas de recarga que emplea cada uno.

Proporciona ejemplos de las obras que se construyen tanto en superficie como a profundidad, para obtener mejores resultados, de acuerdo a las condiciones locales y geomorfológicas donde se encuentre un acuífero.

## CAPÍTULO IV. BENEFICIOS Y DAÑOS

Como es sabido, todos los métodos o técnicas de desarrollo de algún proyecto, tienen ventajas y desventajas que es necesario evaluarlas para llegar a tomar una decisión que sea la óptima para todos.

Por tal razón en este capítulo se menciona parte de los pros y contras, que representa la recarga artificial y las medidas que se pueden tomar para mejorar la calidad del agua subterránea, además de medidas preventivas para disminuir al máximo (si es posible eliminarlos), los problemas de obturación de canales o poros continuos del material, que impiden la infiltración del agua al acuífero o disminuyen las aportaciones de éste a la superficie.

#### CAPITULO V. REGIONALIZACION DE LOS EFECTOS

Debido a la gran extensión de los acuíferos (refiriéndose a su geología), los efectos que este presenta al ser explotado, se dejan sentir en toda una región, es decir no son locales.

Es necesario estudiar cual es el comportamiento del material poroso, desde sus propiedades elásticas y plásticas, para conocer ecuaciones que permitan calcular la velocidad de propagación, del efecto de explotación del acuífero por ejemplo, o de acuerdo al medio una velocidad de infiltración del agua, etc.

Se analiza cual sería su comportamiento si se tratara de un medio homogéneo e isotropo, ya que se sabe no existe una formación geológica totalmente homogénea. Esta es una conceptualización para simplificar su análisis.

#### CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo a grandes rasgos informa de cuáles pueden ser las medidas generales que se pueden tomar para determinar si un método es adecuado o no. Se escribe una serie de ideas para evaluar si es conveniente emplear el método o bajo que condiciones si funcionaria, etc. es decir es la conclusión.



## REFERENCIAS O BIBLIOGRAFIA

En esta sección se encuentran todas las fuentes de consulta empleadas para el desarrollo del trabajo.

Las referencias pueden ser libros, revistas, folletos y artículos especializados de hidrología que se emplearon para confirmar y ampliar el temario de esta tesis.

## CAPTULO II

### RECARGAS NATURAL E INDUCIDA

En toda actividad humana interviene directa o indirectamente el uso del agua. Las formas de obtenerla varían, de acuerdo a las regiones y condiciones climatológicas de cada lugar. El hombre ha observado que es necesario hacer uso tanto de corrientes superficiales como de corrientes subterráneas.

Estas últimas constituyen una fuente importante de abastecimiento, pero es una exigencia tener que reponer el agua extraída para mantener un equilibrio hidrológico y un mejor funcionamiento del acuífero.

Existen diversas formas de recargar un acuífero, una de ellas la más común es la recarga natural, que está en función del agua infiltrada por precipitación, corrientes superficiales, lagos, etc. Es decir obedece el ciclo hidrológico y además existen temporadas donde este tipo de recarga es abundante y predomina.

Otra forma de recarga se conoce como recarga inducida, en ésta interviene la mano del hombre, es decir una manera de hacer llegar el agua al subsuelo. Se realizan construcciones especiales para llevarla a cabo. Esta técnica se complementa muchas veces con la recarga natural.

## 11.1 PROCESO DE RECARGA NATURAL DE LOS ACUIFEROS

Para entender el proceso natural de recarga es necesario tomar como base el ciclo hidrológico del agua, en sus diferentes componentes para observar la influencia de cada uno en la recarga del acuífero.

El vapor de agua atmosférico se condensa en las nubes que engendra la precipitación (P), siendo ésta el factor principal y más importante en la recarga natural de un acuífero.

Al llegar al suelo, una parte de las precipitaciones circula en superficie hacia lagos, mares y océanos, a los que alimenta; es el arroyamiento de superficie (R).

Otra porción, la infiltración (I), atraviesa la superficie, penetra en el suelo y el subsuelo, alimentando las aguas subterráneas que constituyen la reserva del agua del suelo y los depósitos de los mantos acuíferos.

Las aguas subterráneas circulan en profundidad o en superficie hacia la red hidrográfica y reaparecen en el ciclo.

Dentro de las formas naturales de recarga se tienen también:

- Ríos
- Lagos o Lagunas
- Zonas de irrigación
- Presas
- Serpenteos, etc.

Se analizará cada concepto y su influencia.

- *Precipitación:* Las precipitaciones agrupan todas las aguas meteóricas recogidas en una cuenca, vertiente o zona determinada. Se presenta en forma líquida (lluvia, niebla, rocío) o sólida (nieve, granizo, escarcha). Constituyen el factor principal de la recarga por el volumen captado en una región, la cual origina la *Infiltración*.

La infiltración representa la cantidad de agua que penetra en el suelo y el subsuelo, donde pasa a alimentar las aguas subterráneas.

Existen diversas formas de obtener la infiltración, por ejemplo:

- *Ríos*: La trayectoria del agua de los ríos a través de zonas permeables, permite la infiltración de agua en la base del río y en sus laterales; en este caso se tiene infiltración vertical y horizontal. La cantidad de agua infiltrada está en función del tiempo de contacto de una masa líquida sobre una área del terreno. Debido al movimiento del agua la infiltración por este medio es poca y depende, además de la permeabilidad, también del gradiente hidráulico.

- *Lagos o Lagunas*: Estas funcionan como depósitos de agua, la cual se infiltra verticalmente. La cantidad de agua filtrada es considerable, esto se debe al tiempo de retención de ésta sobre el terreno y a las mismas propiedades mencionadas para los ríos.

- *Zonas de Irrigación*: Es en terrenos de cultivo donde generalmente se presenta este proceso, consiste en distribuir agua en zonas o terrenos de alta permeabilidad, permitiendo la alimentación de los acuíferos o corrientes subterráneas.

- *Presas*: La cantidad de agua filtrada depende del tiempo de retención de ésta en un sitio fijo y la presión ascendente causada por el agua sobre la base de la presa.

En general la recarga natural depende de varios factores, entre los que se encuentran la permeabilidad vertical de la capa superior del acuífero; el gradiente hidráulico; el grado de saturación de esta zona sobre el nivel estático; el área de contacto; el tiempo de permanencia de la carga hidráulica sobre la superficie del terreno; y de otros factores que aunque no están bien definidos, tales como el proceso de evaporación, la porosidad efectiva de la zona no saturada, el proceso de capilaridad, la resistencia de las burbujas de aire, etc.

El mecanismo hidrodinámico de la recarga natural, ejemplificando el caso de un río, o depósito superficial tiene el siguiente comportamiento:

### FASE I. Formación y avance del bulbo de infiltración:

Esta fase se sitúa entre el momento en que llega el agua al depósito y el instante en el que el acuífero comienza a recibir la misma. La figura 11.1.1 muestra este fenómeno.

En la "zona no saturada" el flujo de agua es esencialmente vertical, el agua que recibe la formación se va introduciendo poco a poco en el terreno, ocupando cada vez un porcentaje de huecos y humidificando. Formando así el bulbo que va descendiendo.

Si el caudal de entrada es pequeño, no se llegará a humedecer el terreno de la "zona no saturada". Por el contrario, si dicho caudal es suficiente, se favorecerá la humidificación progresiva del terreno subyacente hasta la "zona saturada".

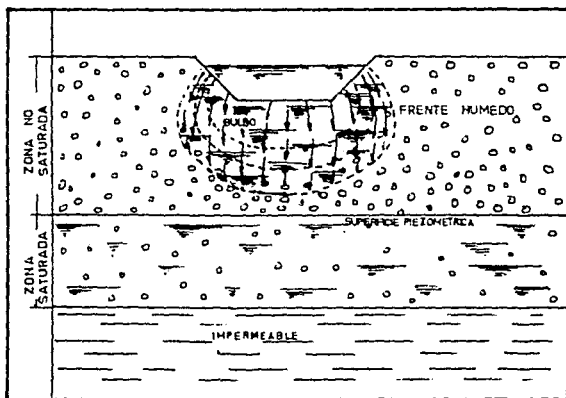


Fig. 11.1.1

FASE II. Abombamiento de la superficie piezométrica.

En el momento en el que el frente húmedo se pone en contacto con el límite superior de la "zona saturada" el nivel piezométrico empieza a subir. Toda el agua introducida se almacena formando una cresta de agua en aumento. El crecimiento continúa hasta que alcanza un límite de control que impide la expansión. La siguiente figura ejemplifica esta fase.

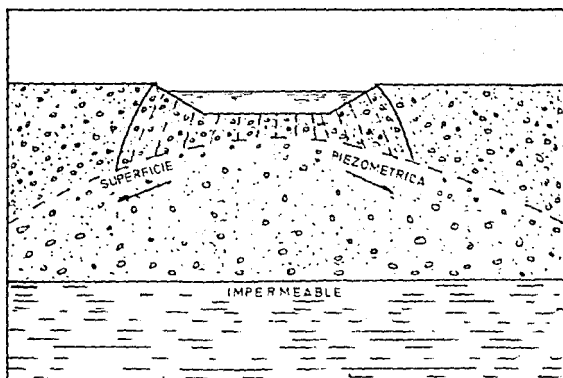


Fig. II.1.2

En la figura II.1.3 se representa un control vertical. La cresta ha aumentado hasta alcanzar la base de los depósitos de recarga. En este momento el crecimiento en extensión lateral, prosigue hasta que alcanza un lugar de drenaje.

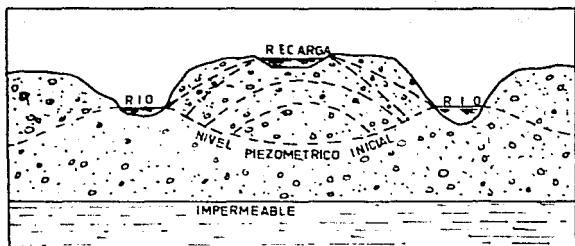


Fig. II.1.3

En la siguiente gráfica, la cresta alcanza el control lateral sin haber alcanzado el control vertical (depósito). El crecimiento en altura puede seguir hasta que se alcance el límite de control vertical.

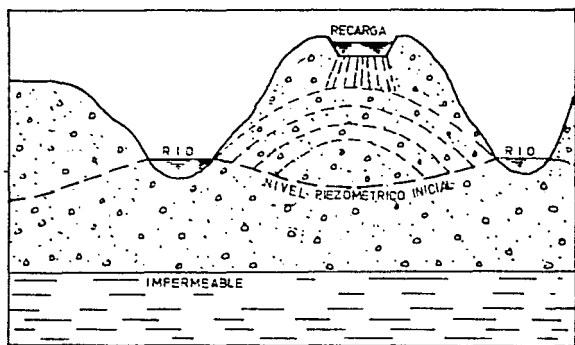


Fig. II.1.4

FASE III. Recarga en régimen estable.

Una vez que se han alcanzado los límites de control, el volumen de agua no varía, y entra tanta agua como se descarga.

FASE IV. Desaparición de la cresta de agua al cesar la recarga:

El agua puesta en almacenamiento por encima del nivel piezométrico está allí temporalmente. Al cesar la recarga se drena paulatinamente hacia los controles laterales hasta adaptarse a la superficie piezométrica natural.

## 11.2 MOVIMIENTOS HORIZONTAL Y VERTICAL

El mecanismo de recarga de los acuíferos es muy complejo en su comportamiento; para evaluarlo se aplica la ley de Darcy, pero es necesario dividirlo en dos componentes principales: Vertical y Horizontal.

- Movimiento Vertical: Se puede estudiar la circulación vertical de las aguas en el suelo y el subsuelo, para el caso teórico de un material acuífero ideal, homogéneo e isotrópico, con un substrato impermeable horizontal, sin flujo lateral.



En esta hipótesis, el agua circula únicamente en sentido vertical ascendente o descendente. La superficie hidrostática de las aguas subterráneas está determinada por el equilibrio entre la alimentación del terreno por infiltración y las pérdidas por evaporación, manteniendo el movimiento ascensional de las aguas subterráneas. Ver figura 11.2.1

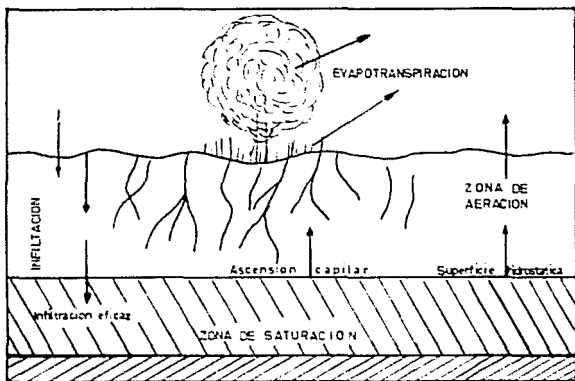


Fig. 11.2.1

Movimiento descendente: Las aguas de infiltración descienden por el suelo bajo la acción de la gravedad. Si se parte de una arena completamente seca, una parte del agua quedará retenida para constituir el agua pelicular o agua de retención. Esta adsorción del agua cesa en el momento en que el coeficiente de retención específica quede cubierto.

Si la alimentación en la superficie continúa, el agua circula verticalmente hasta la superficie hidrostática, donde el agua descendente por gravedad se acumula en el terreno, al que satura hasta el límite de porosidad eficaz. La superficie hidrostática de las aguas subterráneas se eleva manteniendo siempre su franja capilar encima.

Si el agua contenida por un suelo no estuviera sujeta a otra fuerza que la gravedad, el material situado por encima de la superficie freática (lugar geométrico de los niveles que alcanza la superficie del agua en pozos de observación en libre comunicación con los vacíos del suelo), se hallaría seco.

En realidad, en el terreno, el suelo se halla completamente saturado hasta cierta distancia por arriba del nivel de saturación y parcialmente saturado encima de este nivel, a partir del cual se dice que está húmedo.

Si la parte inferior de una masa de suelo seco se pone en contacto con el agua, el líquido sube por los vacíos hasta alcanzar cierta altura por encima del nivel libre. Este ascenso del agua se atribuye a la tensión superficial que se desarrolla en la zona límite entre el aire y el agua.

El valor mínimo a que puede reducirse el contenido de humedad de un suelo, cuando el mismo se halla sujeto al drenaje por gravedad, se llama capacidad de retención de agua del suelo. Para obtener valores numéricos que sirvan de comparación sobre la capacidad de retención de agua de los diferentes suelos se utilizan varios procedimientos de laboratorio. En algunos de estos procedimientos, conocidos como métodos gravitacionales, se hace drenar el suelo bajo el único efecto de la gravedad. En otros, llamados métodos por succión, la fuerza de la gravedad es incrementada sometiendo al vacío la base inferior de la muestra, o a presión su base superior. En un tercer tipo, llamado método centrífugo, las fuerzas de la gravedad son reemplazadas por fuerzas de inercia de mayor intensidad.

Si se conoce la capacidad de retención de agua de un suelo, así como la relación de vacíos después del drenaje, y el peso específico absoluto de las partículas sólidas, se puede calcular el grado de saturación  $S_r$ , y la relación espacio de aire  $G_a$ . La relación espacio de aire o grado de aireación se define por la ecuación:

$$G_a = \frac{\text{espacio de aire}}{\text{espacio vacío total}} = 1 - \frac{S_r (\%)}{100}$$

En general el movimiento vertical se denomina de esa manera porque su componente principal es la vertical, pero en realidad sigue una trayectoria de acuerdo con la mínima resistencia que el suelo y aire le propician.

Es necesario hacer notar que como el acuífero no es homogéneo, los poros continuos forman canales sinuosos, presentando mayor resistencia al paso del agua en algunos puntos y menor en otros casos.

Este movimiento obedece a la siguiente ecuación; en realidad se considera medio homogéneo.

$$V = K i$$

donde:

$K$  = Conductividad hidráulica vertical como función de  $\theta$   
 $\theta$  = Porosidad del material no saturado o parcialmente saturado

$$i = \text{Gradiente vertical} \quad \frac{h_2 - h_1}{L} = 1$$

En general la diferencia de cargas  $h_2$  y  $h_1$  es precisamente la longitud  $L$ .

- **Movimiento Horizontal:** Este movimiento puede analizarse estudiando el desplazamiento lateral de un gasto o masa de líquido. Se puede considerar el flujo desde dos puntos diferentes: en un instante dado, o bien, a lo largo del tiempo. Estos dos métodos permiten definir, el primero las líneas de corriente y el segundo el régimen permanente.

Se considera que los drenes, ríos y arroyos subterráneos constituyen principalmente este movimiento.

Hechas estas consideraciones, se parte de la Ley de Darcy:

Su exactitud es admitida actualmente, para la mayoría de los casos de circulación de las aguas subterráneas. Esta ley no es válida mas que en unas condiciones netamente definidas:

- Medio Homogéneo e Isótropo
- Substrato impermeable horizontal
- Flujo en Régimen Laminar.

Ya se ha demostrado que el régimen laminar está ligado a una velocidad crítica determinada por el número de Reynolds. Esta velocidad crítica  $v_c$ , de valor  $v_c = \nu Re/D$ , es proporcional, por otra parte, al coeficiente de viscosidad cinemática  $\nu$  e inversamente proporcional al diámetro  $D$  de los espacios por donde circula el agua.

Por consiguiente, los límites de aplicación de la ley de Darcy vienen determinados por dos grupos de factores que se influyen mutuamente:

- Los unos relativos al flujo: velocidad, gradiente hidráulico y número de Reynolds.
- Los otros concernientes a las características de los terrenos acuíferos (complejo sólido-agua): temperatura, porosidad eficaz y permeabilidad.

Darcy, para explicar sus análisis realizó un experimento, el cual es el siguiente: Utilizó cilindros verticales de 2.50 m de altura y 0.35 m de diametro interior, llenos de arena, con un espesor  $e$  y bajo una carga de agua  $H$ . La composición granulométrica del material aculfero era:

58 % en peso de granos de 0.77 mm

13 % en peso de granos de 1.1 mm

12 % en peso de granos de 2 mm

17 % en peso de grava.

La porosidad total era de un 38 %

El flujo se rige por la siguiente fórmula:

$$Q = k S \frac{H}{e} \quad \dots\dots (1)$$

donde:

$Q$ , es el caudal de flujo, en  $m^3/seg$

$H$ , la altura de carga del agua, en metros

$S$ , la superficie de la sección, en  $m^2$

$k$ , un coeficiente de proporcionalidad, ligado a la naturaleza de la arena. Para la arena utilizada:  $k=0.0003$  m/s

$e$ , el espesor de la columna de arena, en metros.

$H/e$ , es la pérdida de carga por unidad de longitud,

o la pérdida unitaria, o gradiente hidráulico  $i$ .

La fórmula (1) en funcion de  $i$ :

$$Q = k S i$$

Darcy demostró, de este modo, que el volumen de agua que atraviesa una columna de arena, es proporcional a la carga, e inversamente proporcional a la longitud de esta columna.

La velocidad  $v$  en la unidad de tiempo, es igual a:

$$v = \frac{Q}{S}$$

Esta fórmula es homogénea y los distintos factores son expresados en unidades similares. La velocidad  $v$  es una velocidad aparente, ya que es el cociente del caudal  $Q$  por la superficie total  $S$ , comprendiendo por consiguiente los espacios vacíos y el material sólido.

El gradiente hidráulico  $i$  es sinónimo de pendiente del manto por unidad de longitud, o de pérdida de carga por unidad de trayecto, o pérdida de carga unitaria.

El coeficiente  $k$  es el coeficiente de permeabilidad de Darcy. Este coeficiente se relaciona con el coeficiente de permeabilidad intrínseca  $k_i$ , o permeabilidad geométrica, mediante la relación:

$$k = k_i \gamma / \mu$$

donde  $\gamma$  es el peso específico del líquido, y  $\mu$  la viscosidad; ésta varía dentro de unos límites amplios, en función de la temperatura. El coeficiente de permeabilidad intrínseca es pues función de esta última. Sin embargo, las condiciones habituales de yacimiento de las aguas subterráneas, las variaciones térmicas así como las de viscosidad del agua y del peso específico, son pequeñas, por cuya razón se asimila el coeficiente de permeabilidad de Darcy al coeficiente de permeabilidad intrínseca; al primero se le denomina también conductividad hidráulica por su similitud con la conducción de un fluido.

En este caso, el flujo en dirección horizontal, representa menos restricciones ya que la permeabilidad en esta dirección es alta en relación a la vertical. Esto se debe al proceso de sedimentación bajo el cual se formó el estrato. Este comportamiento sigue las ecuaciones de flujo en una dirección.

## GENERALIZACION DE LA LEY DE DARCY

En la dirección del flujo y sobre un segmento  $L$ , tomado sobre un hilo líquido, la pérdida de carga es igual a:

$$-\delta (z + p/\gamma) = -\delta h$$

La forma general de la ley de Darcy es, en este caso:

$$v = -k \frac{dh}{dL}$$

Sobre los tres ejes de coordenadas  $x$ ,  $y$  y  $z$  los componentes de la velocidad son:

$$V_x = k_x \frac{\delta h}{\delta x}$$

$$V_y = k_y \frac{\delta h}{\delta y}$$

$$V_z = k_z \frac{\delta h}{\delta z}$$

En hidrodinámica, el potencial de velocidades  $\phi$  se define como una función escalar del espacio y del tiempo. Puede ser definido como:

$$\phi = -kh$$

sustituyendo este término se tiene:

$$V_x = -\frac{\delta \phi}{\delta x}; \quad V_y = -\frac{\delta \phi}{\delta y}; \quad V_z = -\frac{\delta \phi}{\delta z}$$

Existe por consiguiente, un potencial de velocidades en el movimiento de las aguas subterráneas. Todos los tipos de movimiento deben satisfacer la ecuación de continuidad, cuya forma general es:

$$-\left[ \frac{\delta(\rho v_x)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho v_y)}{\delta y} + \frac{\delta(\rho v_z)}{\delta z} \right] = \frac{\delta \rho}{\delta t}$$

donde  $\rho$  es la masa específica del líquido, y  $t$  la duración de flujo.

En el flujo de régimen permanente,  $t$  y  $\rho$  son constantes, si el líquido se considera incompresible. Por lo tanto:

$$\frac{\delta v_x}{\delta x} + \frac{\delta v_y}{\delta y} + \frac{\delta v_z}{\delta z} = 0$$

Reemplazando ahora  $v_x$ ,  $v_y$  y  $v_z$  por sus valores:

$$\frac{\delta^2 \phi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \phi}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \phi}{\delta z^2} = 0$$

y reemplazando  $\phi$  por  $-kh$ :

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} = 0$$

Esta fórmula es la ecuación general del flujo en régimen permanente, para medio homogéneo e isotropo, en la que  $h$  juega el papel de potencial de velocidades.

Analizando ahora la cantidad de movimiento del agua subterránea, se tiene:

Sea  $\rho$  la densidad masica de un sistema fluido, esto es, de un conjunto de fluidos y propiedades asociadas que se mueven simultáneamente, que en adelante se llamara simplemente densidad. Si  $q$  es la cantidad de alguna propiedad intensiva del fluido, escalar y arbitraria, el producto  $\rho q$  será la cantidad de dicha propiedad por unidad de volumen.



Considérese ahora un volumen de control  $V_c$  en el seno del fluido como lo muestra la siguiente gráfica, la propiedad que pasa a través de un área diferencial  $\delta S$  en la unidad de tiempo es  $\rho q v n$ , donde  $v$  es el vector velocidad y  $n$  es un vector unitario normal a  $\delta S$  dirigido hacia afuera de  $V_c$ . Entonces la cantidad neta de la propiedad que pasa por toda la superficie  $S$  que envuelve a  $V_c$  en la unidad de tiempo es:

$$Q_{\rho q} = \int_{sc} \rho q v n \, dS$$

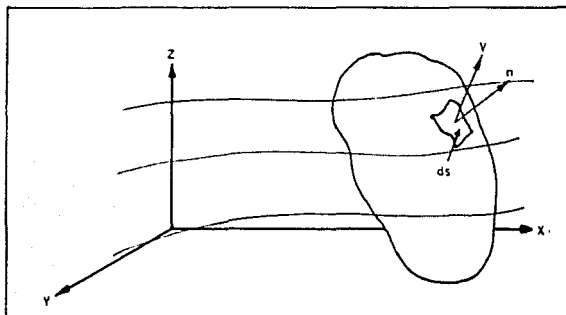


Fig. II.2.2

Partiendo de esta expresión y aplicando versiones diferenciales se tiene que:

Si se acepta que el volumen de control utilizado es de dimensiones diferenciales, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\text{div}(\rho q v) + \frac{\partial(\rho q)}{\partial t} - D(\rho q) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

donde  $D(\rho q)$  es la tasa de creación por unidad de volumen y de tiempo; y esta ecuación representa la versión diferencial tridimensional de la ecuación de conservación. Es posible obtener ecuaciones diferenciales bidimensional y unidimensional de conservación de la propiedad arbitraria, que son, respectivamente:

$$\frac{\delta(\rho q v_x h)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho q v_y h)}{\delta y} + \frac{\delta(\rho q h)}{\delta t} - hD(\rho q) = 0 \quad \dots\dots(2)$$

y:

$$\frac{\delta(\rho q v A)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho q A)}{\delta t} - AD(\rho q) = 0 \quad \dots\dots(3)$$

#### ECUACION DE CONTINUIDAD

En el planteamiento de la ecuación de continuidad, la propiedad en estudio es la masa. Entonces:

$$q = \frac{\text{masa}}{\text{masa}} = 1$$

De igual manera, usando  $q=1$  en la ecuación (1) se obtiene:

$$\frac{\delta(\rho)}{\delta t} + \text{div.}(\rho v) - D(\rho) = 0 \quad \dots\dots(4)$$

o bien, si el fluido es incompresible y la creación de masa es nula, resulta la ecuación clásica de continuidad:

$$\text{div.}(v) = 0 \quad \dots\dots(4')$$

Así mismo, las ecuaciones diferenciales bidimensional y unidimensional de continuidad resultan respectivamente:

$$\frac{\delta(\rho v_x h)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho v_y h)}{\delta y} + \frac{\delta(\rho h)}{\delta t} - hD(\rho) = 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

y:

$$\frac{\delta(\rho Q)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho A)}{\delta x} - AD(\rho) = 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

Una de las posibles interpretaciones del término de creación de masa se tiene cuando existe un gasto lateral por unidad de longitud  $q_l$ : en ese caso por ejemplo, la ecuación (6) se escribiría, para un fluido incompresible, como:

$$\frac{\delta(Q)}{\delta x} + \frac{\delta(A)}{\delta t} - q_l = 0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

#### ECUACION DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO

En este caso la propiedad en estudio es la cantidad de movimiento, que por definición es el producto de la masa por la velocidad. Dado que  $q$  es la cantidad escalar, resulta necesario definir una cantidad de movimiento para cada dirección. Entonces, para la dirección  $x$ ,  $q$  es:

$$q = \frac{mv_x}{m} = v_x \quad \dots\dots\dots(8)$$

donde  $m$  es la masa. La versión diferencial de la ecuación tridimensional de cantidad de movimiento se obtiene al sustituir la ecuación (8) en la (1):

$$\frac{\delta(\rho v_x)}{\delta t} + \text{div}(\rho v_x v) - D(\rho v_x) = 0 \quad \dots\dots\dots(9)$$

con ecuaciones similares para y y z. Al desarrollar el término de divergencia de la ecuación (9) y al sustituir en ésta la ecuación (4') se obtiene:

$$\rho \frac{\delta v_x}{\delta t} + \rho v_x \frac{\delta v_x}{\delta x} + \rho v_y \frac{\delta v_x}{\delta y} + \rho v_z \frac{\delta v_x}{\delta z} = D(\rho v_x) \dots (10)$$

Que es la ecuación general que podemos usar para calcular la cantidad de movimiento del agua en tres direcciones.

### 11.3 FUENTES DE AGUA PARA LA RECARGA

Un condicionante totalmente necesario para realizar cualquier tipo de recarga artificial de acuíferos, es precisar aguas excedentes.

El agua empleada proviene principalmente de las siguientes fuentes:

- Agua Superficial Continua (curso fluvial permanente) o Discontinua (escorrentía de las aguas de tormenta), tomada directamente o con cierto grado de tratamiento.

Esta fuente representa la aportación de un gran porcentaje de agua, que se puede emplear para la recarga. Este porcentaje queda limitado por las condiciones climatológicas del lugar. En zonas donde se tienen corrientes continuas, lagos o lagunas, es común encontrar depósitos especiales o presas para almacenar el agua, lo que representa la manera de captarla. También se tienen periodos donde es más conveniente el almacenamiento, esto es en el tiempo de lluvias. Para llevar a cabo la recarga usando esta fuente tendría que estudiarse la posibilidad de si existe una fuente cercana o es necesario importarla de otro lado, lo que implicaría ciertos costos y desventajas.

Otra desventaja que esta fuente tiene, es que si se encuentra cerca de un terreno muy permeable aumentan las pérdidas por infiltración, lo cual en cierta manera la aprovecha el acuífero, pero si se emplea el método de pozos de recarga el volumen con el que se dispondría sería menor. Además existen pérdidas por evaporación.

En regiones no contaminadas o corrientes que no contienen productos químicos, la calidad del agua puede ser aceptable, lo cual disminuye gastos por tratamiento, pero es necesario hacer un análisis del contenido de impurezas para recomendar de ser necesario un pretratamiento.

- Agua Residual Doméstica (más raramente Industrial), que con cierto grado de tratamiento es posible reutilizar o mezclar con agua procedente de otra fuente.

El volumen de agua captado por este medio es aceptable para considerarlo una fuente de recarga. La manera de almacenarlo es en depósitos o estanques de aguas residuales domésticas, el período de captación es constante ya que el agua urbana es usada y desechada diariamente.

Las ventajas que representa este medio, es que el volumen aportado se puede mantener constante y, si su uso fue exclusivamente doméstico, puede ser que la calidad del agua no sea tan mala y con tratamiento previo reutilizarla.

En caso que se tuviera agua residual industrial es forzoso llevar a cabo un análisis químico para determinar si es posible usarla mediante algún tratamiento, o desecharla por completo.

- Agua Procedente de otro Acuífero.

En esta fuente, la aportación directa se extrae mediante pozos o sondeos. Este acuífero puede estar o ser alimentado por otro acuífero. La manera de captar el agua es con pozos y almacenándola en superficie.

De acuerdo a su recorrido geológico se considera que el agua se va impregnando de sales y minerales, lo que representa de ser necesario un tratamiento previo, esto depende definitivamente de la calidad que tenga el agua subterránea con la cual se va a mezclar. El tratamiento en este caso sería la mezcla con otra agua de calidad diferente para obtener una calidad aceptable.

#### 11.4 RECARGA INDUCIDA

Cualquier proceso por el que el hombre fuerce la transferencia de agua superficial a sistemas de agua subterránea se puede considerar como Recarga Inducida.

En años recientes, particularmente en la áreas más pobladas de América del Norte, donde los desarrollos para fuentes de agua han alcanzado o excedido los límites de explotación, existe un esfuerzo considerable sobre la optimización de los sistemas de recursos de agua. Un desarrollo óptimo, generalmente involucra el uso en conjunto de aguas subterráneas y aguas superficiales. En muchos casos, involucra la importación de aguas superficiales desde áreas donde este recurso es abundante a áreas donde no lo es, o la conservación del agua superficial en tiempos de abundancia para uso en tiempo de escasez.

Estos dos métodos requieren facilidades de almacenamiento y es con frecuencia ventajoso almacenar agua en el subsuelo, donde las pérdidas por evaporación son mínimas, también sirve para rellenar fuentes de aguas subterráneas en áreas sobreexplotadas.

El método más común involucra la infiltración en cuencas de esparcimiento en acuíferos de alta permeabilidad no confinados y aluviales.

En muchos casos las cuencas de esparcimiento están formadas por diques en canales naturales. El proceso de recarga involucra el aumento de agua subterránea. La extensión areal del volumen, depende del tamaño y de la forma de la cuenca de recarga, la duración, la configuración estratigráfica del subsuelo y las propiedades hidráulicas saturadas y no saturadas de los materiales geológicos.

En el método de irrigación el objetivo es incrementar la infiltración por diversas técnicas agrícolas con influencia en la superficie aprovechando las pendientes, áreas de vegetación, etc. El propósito es aumentar el tiempo y área de contacto, y la infiltración en presas donde se tiene agua de lluvia.

Aún en prácticas de irrigación eficientes una cierta porción del agua dispersada en un área no es empleada como uso de consumo cuando se explota un acuífero. Generalmente un porcentaje del orden del 20 al 40 % del agua extraída es usada para irrigación.

El agua usada puede ser bombeada desde un acuífero subyacente, de agua superficial o importada de otras regiones. Obviamente lleva consigo sales y otras impurezas que va adquiriendo en su recorrido y en zonas de raíces.

Algunas veces el flujo de retorno a la superficie y ésta a su vez al acuífero, es creado con el propósito de lavar las sales en algunas zonas. Es frecuente que el agua con sales llegue al acuífero, ya que éste se encuentra bajo zonas de irrigación agrícola y existen fenómenos modificadores que no permiten que la sal sea absorbida en las partes superiores del acuífero.

Por simplicidad se ha empleado el término sal, pero debe entenderse que incluyen también, pesticidas, fertilizantes y mucha otra clase de contaminantes del agua subterránea.

El problema de calidad y flujo de retorno y lavado de zonas de raíces, debe ser estudiado más cuidadosamente cuando intervienen aguas de desecho y otras contaminadas.

La recarga inducida tiene dos metas: Una recargar el acuífero con agua de ríos que puede ser bombeada para usos beneficiarios, o a través de cualquier instalación de recarga; y permitir la infiltración y purificación del agua del río a través de su recorrido del acuífero hacia las instalaciones de depósito. El acuífero actúa como un largo filtro de arena. Puede detener de dos a tres meses el agua en algunas capas, éste es un ejemplo típico. Un río sirve como fuente principal en este tipo de recarga, y la razón de pérdida o de agua infiltrada está en función de la profundidad del agua del río y la permeabilidad de éste. Se ha observado que cuando un río es muy grande, en términos de flujo, el intercambio de agua entre el río y el acuífero prácticamente no afecta, sin embargo en corrientes pequeñas las pérdidas naturales pueden disminuir el nivel de agua de la corriente y aún secarla completamente.

## II.5 RECARGA ARTIFICIAL

La Recarga Artificial podría definirse como el conjunto de técnicas cuyo objetivo principal es permitir una mejor explotación de los acuíferos por aumento de sus recursos y creación de nuevas reservas, mediante una intervención directa o indirecta en el ciclo natural del agua.

La Introducción forzada (no natural) de agua en un acuífero es para aumentar la disponibilidad y/o mejorar la calidad del agua subterránea.

Los tipos de acuíferos donde es posible llevar a cabo la recarga artificial, en un principio, puede ser en cualquier tipo de formación permeable que tenga condiciones para almacenar y transmitir el agua.



Normalmente se realiza en acuíferos libres con nivel freático a profundidad variable (desde muy próximo a la superficie hasta un centenar o más de metros de profundidad). La recarga es más frecuente en:

- Formaciones de Materiales Granulares:
  - Depósitos Aluviales
  - Dunas y Arenas litorales
  - Areniscas
- Formaciones de Materiales Consolidados:
  - Calizas y Dolomías
  - Calcarentitas
  - Materiales Volcánicos (basaltos jóvenes)

La producción de un acuífero puede aumentar artificialmente mediante la inyección de agua. En la mayoría de los casos esto equivale a reducir la escorrentía superficial del área.

Cuando los acuíferos son no confinados, la zona vadosa es permeable y sin estratos de textura fina que impidan el movimiento descendente del agua, y suelos con arenas permeables están disponibles; la Recarga Artificial del acuífero con cuencas de infiltración es la manera preferida. Cuando los acuíferos son confinados las tierras más propicias para las cuencas de recarga no están disponibles o los estratos están restringidos en la zona vadosa, entonces se usan los pozos de recarga o inyección.

Aunque la recarga de acuíferos con cuenca de infiltración es una práctica ya establecida, todavía hay un número de preguntas que deben responderse antes que un sistema de recarga pueda ser diseñado y manejado para una ejecución óptima hidráulica y económica. Una de las preguntas clave es el sitio de selección incluyendo trabajos del suelo, medidas de conductividad hidráulica, para predecir razones de ser de la misma.

Se necesita una investigación mayor para el manejo adecuado de cuencas de infiltración, especialmente cuando ellas han estado operando por años. Se deben determinar factores de inundación, secado y limpieza de cuencas, así como un pretratamiento óptimo del agua (remoción de sedimentos). En algunas áreas los factores de inundación y secado están determinados por el ciclo de vida de los insectos para evitar problemas.

La profundidad óptima del agua en las cuencas de infiltración debe ser evaluada, las cuencas profundas ejercen mayor presión hidráulica en el fondo, por lo tanto producen una razón de infiltración más alta. Sin embargo, sedimentos u otros materiales obturantes que se acumulan en el fondo están más comprimidos en cuencas profundas que someras, debido al incremento de las fuerzas a través de los materiales obturantes y la profundidad del agua que es mas grande. Esto puede marcadamente aumentar la impedancia hidráulica de los materiales. Un incremento en la profundidad del agua no puede necesariamente producir un incremento en la razón de infiltración; si esta no se incrementa al aumentar la profundidad del agua, la razón de cambio del agua en cuencas profundas es más lenta que en las someras. Esto expone a las algas suspendidas a la luz del sol a un incremento importante en su concentración; esto reduce severamente la infiltración. Más bien una colonia de algas fotosintetizadas, densa, activa, puede conducir a un incremento significativo en el PH del agua debido a la disolución de dióxido de carbono por las algas y causan la precipitación del carbonato de calcio que agravan los problemas de obturación en el fondo. Entonces un incremento en la profundidad del agua en cuencas de recarga puede realmente resultar en infiltración baja, fenómeno paradójico.

Otra pregunta que necesita ser resuelta en el manejo efectivo en un sistema de infiltración para recarga de acuíferos, es que es preferible en cuencas de infiltración con agua estancada donde aún las partículas de suelo más pequeñas pueden asentarse y contribuir a problemas de obturación, o canales de infiltración con movimiento de agua con arena fina suspendida que no se asienta. Respuestas a éstas y otras preguntas pueden ser solamente obtenidas por experimentación en el lugar.

Un proyecto de investigación debe incluir estudios de la capacidad de las zonas vadosas para transmitir el agua al acuífero de manera vertical y horizontal. Los aspectos de la calidad del agua se concentran sobre el agua de recarga y sus efectos sobre la calidad del agua subterránea.

Sin embargo la acumulación de sedimentos en el fondo de las cuencas, el contenido de sal y la razón de absorción del sodio del agua filtrante puede tener efectos significativos en los factores impedantes sobre la razón de 1, a menos que las arenas abajo de la zona de infiltración sean muy gruesas (arenas y gravas) y tengan una historia larga de asentamiento. Los elementos que pueden ser obtenidos a través de la zona vadosa son: Celenio, Arsénico, Boro, Cadmio, Mercurio y Molibdeno.

Los pozos usados para recarga subterránea son casi iguales a los pozos usados como productores de la misma.

El mayor problema técnico con los pozos de inyección es el material obturante del acuífero alrededor del pozo. Debido a ésto el agua para los pozos de inyección debe estar libre de sólidos suspendidos tanto como sea posible. Con frecuencia la capacidad específica para los pozos de inyección es del 30 al 70 % de los de bombeo.

Los métodos empleados para Recarga Artificial están controlados por la situación geológica del área y por consideraciones económicas. Algunos de los métodos posibles son:

- 1.- Almacenamiento de aguas de avenida en depósitos contruidos sobre áreas permeables.
- 2.- Almacenamiento de aguas de avenida para devolverlas mas tarde a los rios.
- 3.- Derivación del caudal de los rios hacia áreas de dispersion en áreas altamente permeables.
- 4.- Excavación de fosas de almacenamiento de agua hasta penetrar zonas permeables.
- 5.- Bombeo de agua dentro del acuífero por medio de pozos de Inyección.
- 6.- Sobreirrigacion en zonas de alta permeabilidad.
- 7.- Construcción de pozos adyacentes a un rio para inducir la filtración a partir del mismo.

Donde las condiciones son favorables, el uso de un acuífero como depósito puede eliminar las perdidas por evaporación, proteger contra la contaminación, proveer un sistema de distribución de bajo costo y en general ser una alternativa de costo menor en comparacion con un embalse superficial. La recarga artificial por medio de pozos, tambien se ha utilizado en las costas para formar conos de inducción como barreras contra la intrusión salina; así mismo se ha utilizado para eliminar aguas servidas; éste ultimo proceso se debe llevar a cabo con gran precaución debido a la posibilidad de contaminar buenos acuíferos.

Pueden considerarse los siguientes aspectos como unos de los más importantes de la recarga artificial.

- *Almacenamiento de agua:* El agua puede ser almacenada en un acuífero, para ser usada posteriormente mediante pozos de bombeo. Como el agua subterránea nunca está en reposo, sino se usa, ésta puede gradualmente fluir o migrar a otra área donde sea más difícil su extracción.

Obviamente, el almacenamiento de agua en cualquier cantidad, significa economía y estudios hidrológicos, por tal motivo esto es posible solo en acuíferos donde la capacidad de retención del agua, está en relación con la porosidad eficaz y no, con las propiedades elásticas del suelo.

El almacenamiento del agua en el subsuelo tiene como todos los procesos, ventajas y desventajas, es por eso que se hará una comparación entre los conceptos que se deben tomar en cuenta para almacenar en superficie o en acuíferos.

- *Almacenamiento en Acuíferos:*

- Costos de los pozos de recarga: costos del terreno para cuencas de infiltración.
- Costos de pozos de bombeo
- Costos de energía
- Pérdidas de agua por evapotranspiración (solamente si los niveles de agua son muy cercanos a la superficie).
- Pérdidas de agua por escurrimiento.

- *Almacenamiento en Depósitos Superficiales:*

- Costos del terreno.
- Costos de represa y otras instalaciones de regularización.
- Producción de energía hidroeléctrica.
- Beneficios por recreación.
- Pérdidas de agua por evaporación.
- Pérdidas de agua por infiltración.
- Disponibilidad de sitios geológicamente buenos.
- Posibilidad de contaminación.
- Distancia para el área de demanda y costos de transportación.

En muchos casos, especialmente en zonas áridas y semiáridas, el almacenamiento en acuíferos puede ser económicamente mejor que el almacenamiento en superficie.

- *Control de la Calidad del Agua:* El agua que se introduce al acuífero y el agua de éste, se mezclan como resultado de la dispersión hidrodinámica. La mezcla también se lleva a cabo en pozos de bombeo.

Cuando se puede controlar la calidad del agua introducida, mediante un tratamiento, ésta puede ser de mayor o menor calidad que la del acuífero según convenga, para formar agua de calidad suficiente para ser explotada.

Para tiempos muy grandes, se pueden presentar reacciones químicas entre los constituyentes del agua introducida y la estructura del suelo.

## CAPITULO III

### METODOS DE RECARGA ARTIFICIAL

La recarga artificial podria definirse como el conjunto de técnicas cuyo objetivo principal es permitir una mejor explotación de los acuíferos por aumento de sus recursos y creación de sus reservas, mediante una intervención directa o indirecta en el ciclo natural del agua, al propiciar una alimentación adicional al acuífero.

La recarga inducida está limitada por la colmatación del lecho del río, si las aguas son turbias o muy polucionadas; la instalación de embalses de decantación o la depuración de vertidos es muy favorable, así como el mantener mediante regulación unos caudales mínimos de dilución durante los estiajes.

La recarga artificial consiste en crear unos dispositivos especialmente diseñados para este fin.

Pueden distinguirse:

- 1.- Sistemas de recarga en superficie.
- 2.- Sistemas de recarga en profundidad.
- 3.- Sistemas mixtos, compuestos por elementos de los dos sistemas anteriores.

Aunque en un principio fue más común la recarga en superficie, actualmente domina la recarga por pozos, en especial en zonas densamente pobladas y próximas a poblaciones.

La selección de un método u otro para cada caso en particular depende de la fuente de agua, la calidad de la misma, el tipo de acuífero, la topografía del terreno, el tipo de suelo, condiciones económicas y geológicas.

### III.1 RECARGA DESDE LA SUPERFICIE

Consiste en extender el agua buscando una gran superficie de contacto agua-terreno. Es útil en caso de acuíferos libres, con estratos poco permeables próximos a la superficie. Los métodos más usuales son:

1.- *Zanjas y Surcos*: Consiste en hacer circular el agua por surcos de 0.3 a 1.8 m de ancho, construidos con los elementos utilizados para el laboreo de terrenos agrícolas. El inconveniente que presenta es el de necesitar gran superficie, pues el terreno inundado alcanza solo entre el 10 y el 20% del total necesario.

Los surcos pueden seguir las curvas del nivel del terreno e irse ramificando arborescamente, o, consistir de una zanja principal y una serie de surcos laterales; la velocidad de circulación debe ser suficientemente alta para evitar que se depositen los materiales finos en suspensión, pero no tan alta que erosione el terreno. Un ejemplo de esto es la siguiente gráfica.

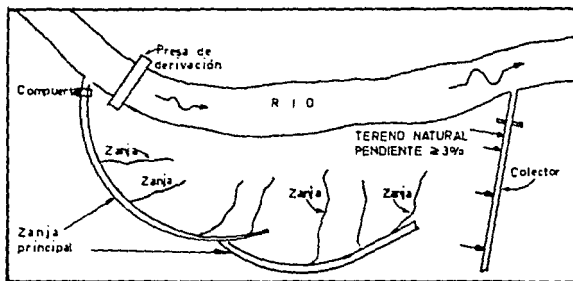


Fig. III.1.1

La característica que se aprovecha en este tipo de obra es la carga hidráulica inicial sobre la superficie.



2.- Depósitos. La gráfica muestra esquemáticamente un sistema que utiliza un depósito excavado en el terreno donde se almacena el agua para dejarla infiltrar lentamente. En la práctica su volumen oscila entre  $(0.5 \times 10^6)$  y  $(5 \times 10^6) \text{ m}^3$  y son poco profundos. Se aconseja una profundidad alrededor de 1.20 m, ya que una menor profundidad da lugar a poca carga de agua y reduce la infiltración, mientras que una mayor profundidad produce un efecto de compactación del terreno.

La disposición de uno o varios depósitos en línea o de forma alargada tiene como objetivo disminuir las interferencias hidráulicas que se producirían si estuviesen más agrupados, al mismo tiempo que facilita la extracción del agua mediante líneas de pozos y drenes paralelos, asegurando un tiempo mínimo de retención y un cierto recorrido en el terreno.

Estos pueden o no tener fondo artificial de gravas o arena. La infiltración se produce predominantemente por el fondo.

La siguiente figura muestra esta característica.

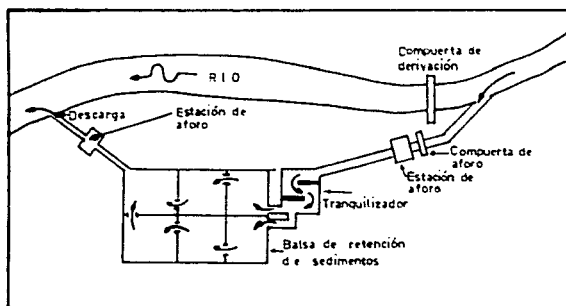


Fig. III.1.2

3.- *Acondicionamiento de Cauces de Ríos:* Cuando no se dispone del terreno adecuado y a precio aceptable para realizar depósitos, también cuando no se precise de una capacidad adicional de almacenamiento de agua (en especial en zonas áridas), se puede hacer la recarga en el mismo lecho del río, ensanchándolo, aplanándolo y levantando canalizaciones a todo lo ancho del cauce de avenidas.

También se pueden construir pequeñas represas transversales. En algunos casos estas represas han sido sustituidas por presas hinchables de caucho o plástico, que se deshinchan en caso de avenidas, permitiendo así el paso del agua sin elevar su nivel.

En este caso se aprovecha la permeabilidad natural del cauce del río, que propicia una recarga más uniforme.

4.- *Fosas:* Cuando el acuífero tiene mucho espesor de materiales sueltos y permeables y su nivel freático está profundo, es posible excavar grandes fosas, algunas de las cuales pueden ser las que resultan de la extracción de gravas, a las cuales se conduce el agua que se va a emplear para la recarga.

Las fosas son dispositivos semejantes a los depósitos, en la que la superficie lateral es importante con relación al fondo. Domina la infiltración por los flancos. Ver figura III.1.3

La profundidad suele ser de unos cuantos metros, aunque a veces puede ser de 10 a 20 m; su principal ventaja consiste en la posibilidad de almacenar el agua de avenidas e infiltrarla lentamente. Ejemplo:

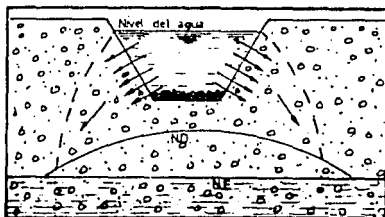


Fig. III.1.3

5.-Ampliación de superficies: Aquí el agua es vertida en construcciones especialmente para ello como son, estanques o cuencas, para permitir la infiltración. El exceso de irrigación se aprovecha especialmente en el tiempo de secas.

La economía de la recarga artificial en técnicas de ampliación de superficies, depende del mantenimiento de altos gastos de infiltración sobre el área, del tipo de suelo y los gastos de agua que se tengan que infiltrar, por ejemplo de 3-15 m<sup>3</sup>/dia (esto es, 15 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/dia) que se ha observado en gravas, de 3 m<sup>3</sup>/dia en gravas y arena, de 2 m<sup>3</sup>/dia en arenas finas y consolidadas y hasta 0.5 m<sup>3</sup>/dia en arenas y sedimentos.

Estas arenas deben limpiarse, la frecuencia de ello depende de las condiciones locales (tipo de agua y suelo). En el siguiente esquema se puede observar una construcción diseñada para éste fin.

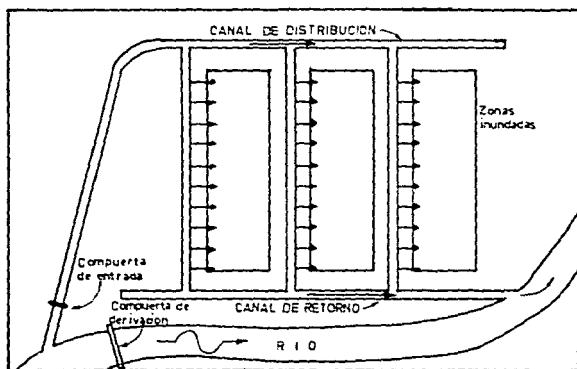


Fig. III.1.4

6.- *Otros Sistemas de Recarga Artificial en Superficie:* En casos de barrancos sometidos a intensas avenidas, si existe terreno suficiente en las zonas llanas de su tramo inferior, se puede proceder a la inundación de áreas extensas. También puede procederse a construir presas en tramos permeables de los ríos, incluso quitando los posibles recubrimientos permeables que pueden existir. El sistema es especialmente apropiado para terrenos calcáreos, fracturados y kársticos, así como en materiales volcánicos recientes.

Algunos tipos de recarga en superficie se hacen en cauces y fuera de ellos, por ejemplo:

- *Serpenteos:* Consiste en aumentar el tiempo y área de contacto entre el agua del río y el terreno, mediante la construcción de una serie de muros en forma de L puestos a un lado y a otro del cauce. Esto obliga a serpentear al agua, con lo que disminuye la velocidad de ésta y aumenta la infiltración del río. Ver figura III.1.5

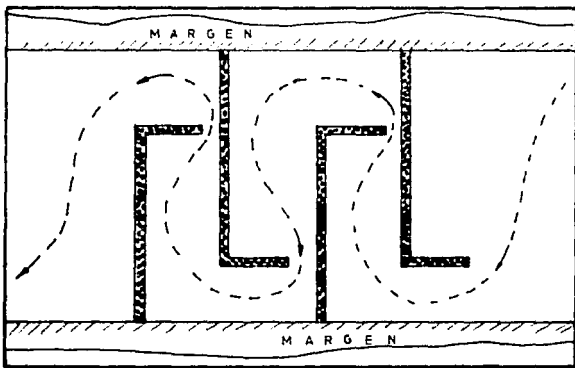


Fig. III.1.5

- **Represas:** Consiste en aumentar el tiempo y la superficie de contacto, mediante la construcción de diques de tierra o presas de goma inflables: en los diques deben preverse vertederos para evitar la rápida erosión de los mismos.

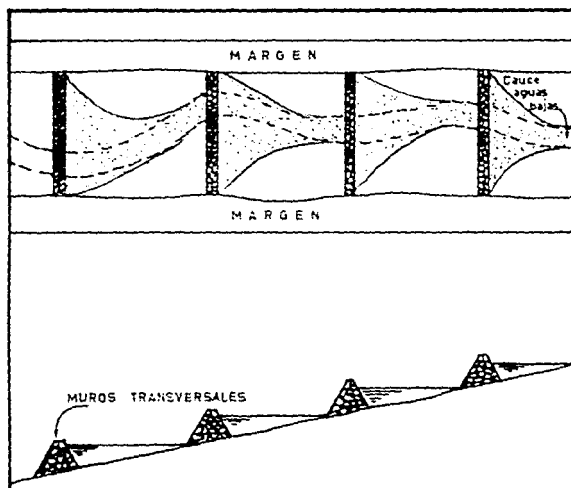


Fig. III.1.6

- **Dragado en el lecho del río:** Consiste en dragar el lecho del río, eliminando finos y mejorando la infiltración. Se debe dragar a poca profundidad y en el mismo sentido de la corriente. Ver figura III.1.7

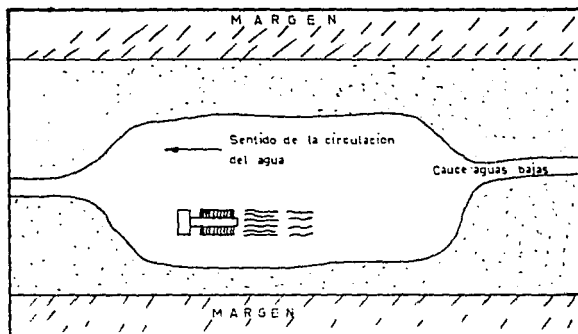


Fig. III.1.7

- *Vasos permeables*: Son depósitos de superficies cuya cerrada no es totalmente impermeable, recargando así el acuífero. Aunque, en principio es un accidente desafortunado, algunas veces éstas obras se construyen con ese fin. Figura III.1.8

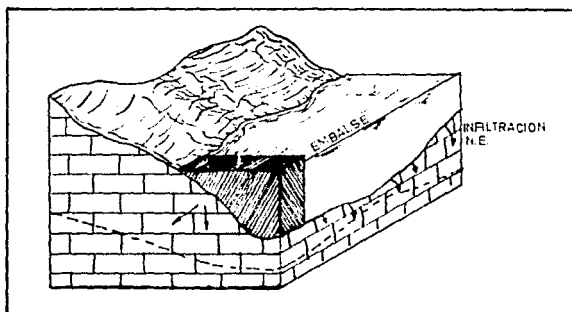


Fig. III.1.8

- Canales: Son dispositivos poco profundos que siguen la topografía del terreno. La infiltración se produce por el fondo y por los lados, con importancia variable según la anchura. Se colocan estaciones de aforo a la entrada del terreno y a la salida del mismo para cuantificar el agua filtrada. Fig. III.1.9

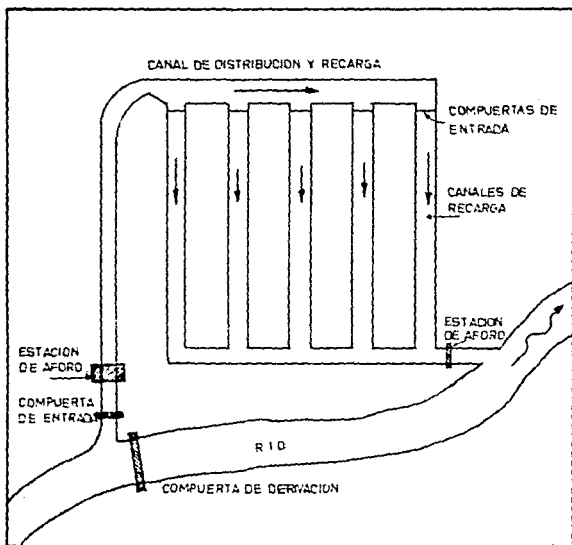


Fig. III.1.9

### III.2 RECARGA EN PROFUNDIDAD

Consiste en introducir agua en el acuífero, generalmente a través de pozos, sondeos, etc. Se emplea de una forma generalizada en terrenos formados por alternancias de niveles permeables e impermeables.

Son esencialmente los pozos verticales, aunque también se emplean pozos de drenes radiales y en algunos casos galerías de infiltración.

El sistema ofrece ciertos inconvenientes que han hecho que se desarrollara más tarde la recarga en superficie, aunque en muchos lugares es actualmente el sistema más importante. Algunas desventajas son:

- 1.- Mayor costo de construcción y mantenimiento
- 2.- Necesidad de utilizar agua de mejor calidad para aminorar los problemas de colmatación, dado que la superficie filtrante es mucho menor.

Es una forma de recarga insustituible cuando el terreno está formado por una alternancia de niveles permeables e impermeables.

El rendimiento de los pozos de recarga es función de la permeabilidad del acuífero y del estado de colmatación del propio pozo. Pero en general se puede recargar alrededor de un 70 % del caudal que produce el pozo por bombeo.

Algunos ejemplos de recarga en profundidad son los siguientes:

- *Sondeos de Inyección*: Mediante la construcción de sondeos profundos se inyecta agua al acuífero. Ver figura III.2.1



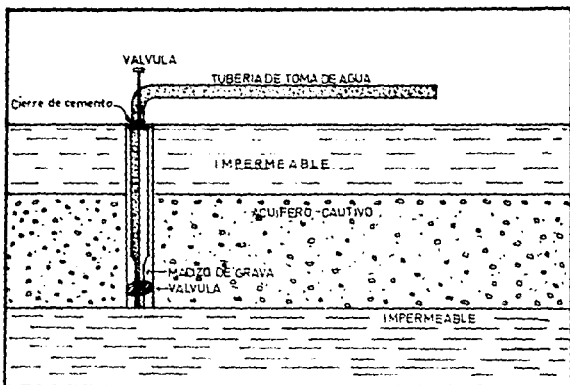


Fig. III.2.1

- Simas y Dolinas: Consiste en aprovechar las simas y dolinas de los terrenos principalmente calcareos para introducir agua en el acuífero.

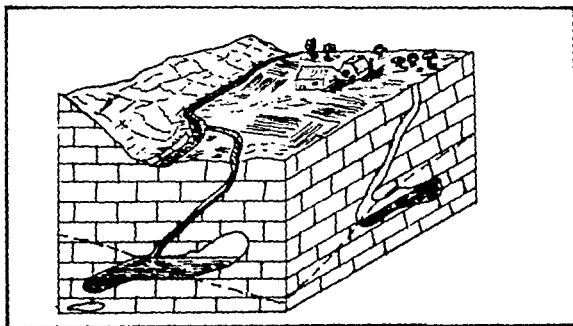


Fig. III.2.2

- *Drenes y Galerías*: Consiste en realizar en el fondo de un pozo, por el que se introduce agua, drenes y galerías. En general están bajo o en el límite del nivel freático.

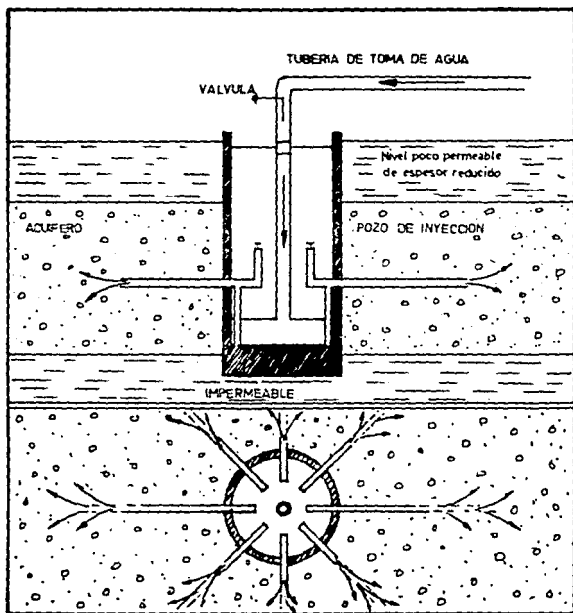


Fig. 111.2.3

### III.3 POZOS DE RECARGA.

Es importante; al tiempo de dimensionar el filtro y el macizo de las gravas, tener en cuenta que el flujo seguirá el camino inverso que en un pozo de bombeo, aunque es usual en muchos casos la recarga y el bombeo alternativamente.

Esto hace que muchos pozos de recarga tengan instalada la bomba que se utiliza para extracción, en cuyo caso la inyección se realiza a veces a través de la bomba y de la misma conducción utilizada para el bombeo; ello da lugar a una pérdida de carga adicional que impide que el rendimiento de la inyección sea el mismo que el del bombeo en el mismo pozo.

Para evitar las pérdidas a través de las bombas se puede utilizar un cabezal de inyección con by-pass (válvula que permite retener el flujo del agua en dirección contraria a la que se inyecte o extraiga, puede ser usada en ambos sentidos), figura 3.3.1, que permite inyectar a través del conducto de bombeo y entre las paredes del pozo, o una tubería especialmente dispuesta, además de poder alternar el bombeo y la inyección, sin perder tiempo en el cambio.

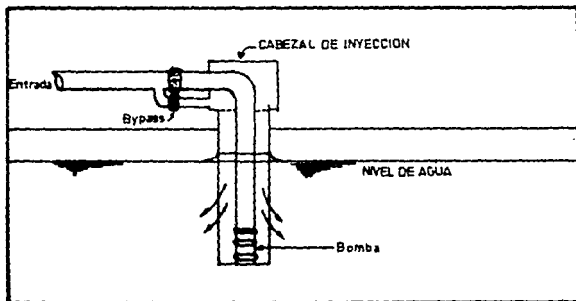


Fig. III.3.1

El efecto de entrada de aire durante la inyección es un problema que conviene evitar. Además de la disminución de la permeabilidad a causa del aire que va llenando los poros del terreno, éste se va acumulando bajo los niveles impermeables o poco permeables a la presión que corresponde a las condiciones de inyección; al cesar ésta se puede liberar y salir bruscamente, arrastrando agua del propio pozo, de forma explosiva, si la columna de agua es insuficiente para amortiguar el efecto.

En los pozos de recarga ocurre también el fenómeno de obturación, el cual acompaña a la reducción de los gastos de inyección, esto ocurre bajo condiciones anaeróbicas. Sin embargo, la velocidad de inyección del agua decrece en su recorrido por el pozo, y la depositación de finos se presenta a cierta distancia del pozo, lo cual dificulta su limpieza. La obturación es más severa en pozos de recarga por lo que debe usarse agua de alta calidad para evitar que esto ocurra.

En los pozos que inyectan agua a presión en acuíferos cautivos, debe cementarse bien el pozo hasta la superficie para evitar que el agua recargada se escape al exterior entre la pared del pozo y la entubación. En los acuíferos libres, la posibilidad de inyectar agua a presión viene limitada por la necesidad de que el cono de inyección no alcance la superficie del terreno; para salvar el escape de agua por la sobreelevación de inyección junto al pozo, conviene disponer de una solera de concreto bien cimentada.

Como normas generales en el proyecto de pozos de recarga conviene considerar los siguientes criterios, supeditados a consideraciones de carácter local:

- 1.- El diámetro de perforación debe ser suficientemente grande para que en acuíferos de arena se permita colocar un macizo de grava que sea de espesor suficiente para evitar que los finos en suspensión colmaten al acuífero. El espesor recomendable puede ser de 30 cm.

- 2.- El diámetro de la entubación interior debe ser suficiente para poder introducir o dejar instalada una bomba de gran caudal para poder realizar los sucesivos desarrollos, a menos que se disponga de otros métodos de limpieza.
- 3.- La rejilla debe abarcar el máximo espesor de acuífero posible para reducir la velocidad de entrada del agua, evitando con ello la colmatación profunda.
- 4.- Es conveniente cementar la parte superior de los pozos de recarga en materiales sueltos para evitar colapsamientos del terreno. Por ese motivo es peligrosa la recarga que durante el bombeo tenga arrastre de arena.
- 5.- Debe preverse el modo de evacuación de las aguas sucias que se extraerán durante los sucesivos desarrollos.
- 6.- El conducto de inyección debe penetrar por debajo del nivel del agua en el pozo.

Se debe observar que el efecto del cono formado por la inyección de agua es inverso al cono de abatimiento de un pozo productor. Pero este efecto obedece las mismas leyes de la hidráulica de un pozo solo que en sentido inverso.

Este efecto fue explicado con más detalle en el Capítulo II sección 2.1 de éste trabajo.

Un ejemplo de los dos fenómenos se muestra en la siguiente figura, donde se tiene un pozo inyector y uno productor.

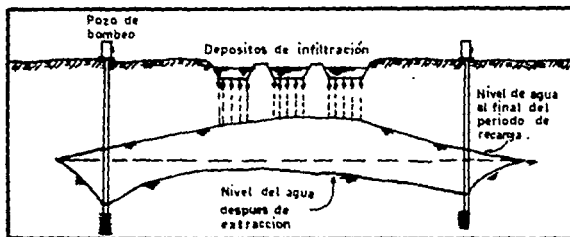


Fig. III.3.2

### III.4 SISTEMAS MIXTOS DE RECARGA

Es evidente que si el mayor problema con que tropiezan los pozos de recarga es la turbidez y el problema de recarga por extensión es el de los niveles impermeables existentes en muchos acuíferos, un método mixto puede ser la solución a ambos problemas.

La figura 3.4.1 muestra un sistema mixto que utiliza dos acuíferos. El primer acuífero, actúa como filtro y el segundo como nivel de recarga final. Las zonas impermeables colocadas en el primer acuífero tienden a lograr un mayor recorrido del agua antes de alcanzar el pozo que la conducirá al acuífero más profundo.

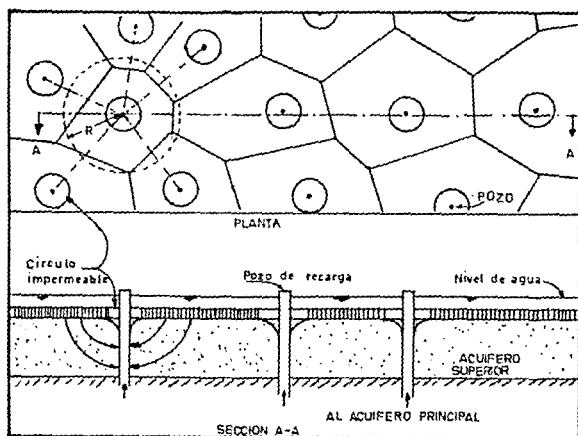


Fig. III.4.1

Como se puede observar, el mecanismo general de los sistemas mixtos es una suma de efectos originados por los tipos de recarga, tanto de superficie como de profundidad.

Es necesario hacer combinaciones de sistemas para aprovechar al máximo las condiciones que presenten los acuíferos, ya que muchas veces, son acuíferos de gran potencial, pero debido a su geología no es posible recargarlo con un solo método.

## CAPITULO IV

### BENEFICIOS Y DAÑOS

Dentro de los métodos de recarga antes mencionados existen ciertas ventajas y desventajas que hacen mas favorable uno u otro método.

A continuación se hace una comparación, más o menos generalizada sobre diversos factores o aspectos que pueden intervenir en la elección de uno u otro método.

La comparación se lleva principalmente entre la recarga en superficie y en profundidad, que son las más generales.

Los factores son tanto benéficos como perjudiciales y es importante considerarlos ya que de ellos dependen los usos de la recarga.

#### - Precio y Disponibilidad del terreno.

EN SUPERFICIE: Puede ser muy difícil o imposible establecerlos en una zona poblada o muy cultivada, por no disponer de espacio, o por ser los terrenos muy caros. Se necesitan terrenos baratos.

EN PROFUNDIDAD: La disponibilidad es pequeña. Precisan poco espacio, por estar limitados los estratos o capas del acuífero por otros impermeables.

#### - Factores Estéticos y Ambientales.

EN SUPERFICIE: Pueden presentar problemas de proliferación de insectos y roedores. Requieren cercados y vallas para proteger a personas y animales, lo cual aumenta los costos de mantenimiento e instalación.

EN PROFUNDIDAD: Escasos. Esta recarga no representa daños ambientales.



*- Permeabilidad del Acuífero.*

EN SUPERFICIE: Media a grande, son terrenos que deben estar bien definidos en sus características para poder usarlos.

EN PROFUNDIDAD: Variable. Se emplean de una forma generalizada en terrenos formados por una alternancia de niveles permeables e impermeables, o cuando existen niveles poco permeables entre la superficie del suelo y el acuífero. Representa cierto riesgo ya que a mayor profundidad la permeabilidad disminuye debido a la presión que soportan los estratos.

*- Construcción de Instalaciones.*

EN SUPERFICIE: Pueden requerir acondicionamientos previos del terreno para nivelarlo, retirar coberturas poco permeables o arcillosas, retirar vegetación, obtener diques resistentes, construir estructuras para la conducción del agua, etc.

EN PROFUNDIDAD: Complicadas. Especialmente las instalaciones de pretratamiento e inyección. La construcción y acondicionamiento es difícil en esta recarga por las profundidades que se manejan.

*- Caudal Recargable.*

EN SUPERFICIE: Pueden llegar a ser muy grandes.

EN PROFUNDIDAD: Notablemente inferior si se compara con el medio de las instalaciones superficiales.

*- Pérdidas por Evaporación.*

EN SUPERFICIE: En determinados pasos pueden ser importantes; si el nivel se encuentra en la superficie o muy cerca de ella las pérdidas por evaporación son muy grandes.

EN PROFUNDIDAD: Nulas. Es una ventaja, ya que si se tiene un nivel profundo las pérdidas por evaporación no existen.

*- Requisitos de Calidad del Agua.*

EN SUPERFICIE: Prácticamente muy pequeños.

EN PROFUNDIDAD: Muy grandes. Que implican un costo de mantenimiento a veces muy importante. Esto se debe al tratamiento del agua antes de introducirla para no alterar y contaminar de manera indeseable la calidad del agua del subsuelo. Se busca mantener o mejorar la calidad del acuífero, pero no bajarla.

- *Colmatación.*

EN SUPERFICIE: Los problemas derivados de la colmatación son generalmente pequeños, solo se producen en el fondo de las presas o depósitos, etc. y esto en baja escala.

EN PROFUNDIDAD: Presentan una gran susceptibilidad a la colmatación. El agua introducida puede provocar reacciones en la roca lo cual reduce el paso de la misma y la entrapa.

- *Grado de Depuración del Agua.*

EN SUPERFICIE: Grande. El paso del agua por el medio no saturado es decisivo para conseguir una buena eliminación de los contaminantes.

PROFUNDIDAD: Pequeño o nulo. El agua pasa por muchas zonas antes de llegar al acuífero, esta en su recorrido va cambiando su contenido de impurezas aumentándolo, lo que representa daño al acuífero.

#### IV.1 CALIDAD Y CONCENTRACION DEL AGUA DE RECARGA

Las consideraciones de la calidad de agua de inyección a tener en cuenta serán las que puedan afectar a la propia instalación de recarga, como turbidez y contenido de algas o bacterias y las que puedan afectar a la calidad del agua resultante en el acuífero, tales como sales que pueden dar origen a precipitados al introducirlos en el acuífero o alterar la calidad de forma indeseable.

La calidad del agua depende también de las condiciones locales, del método empleado y de consideraciones económicas que puedan conducir a un tratamiento previo a la infiltración, o por el contrario, a unos cuidados mayores de las instalaciones de recarga sin tratamiento previo del agua.

La materia en suspensión puede colmatar una cierta profundidad del acuífero y formar una película de lodo en la parte exterior del mismo. Ambos hechos hacen decrecer la capacidad de infiltración. Cuando se recarga por pozos, donde la superficie de infiltración es muy pequeña, conviene que la materia en suspensión no pase de 5 mg/l, mientras que en depósitos que se pueden limpiar fácilmente se pueden admitir hasta 100 mg/l. No obstante, esos valores dependen mucho de condiciones locales, y es preciso detallados ensayos preliminares.

La colmatación biológica ocurre en primer lugar por la existencia de algas en el agua de recarga, en particular por la formación de las mismas en los depósitos de recarga. La mejor forma de combatir la formación de algas y colonias bacterianas es mediante ciclos de llenado y vaciado que mantengan al sistema en condiciones aerobias. Ciertos autores dan límites de 10 mg/l para las algas y 100 000 colonias bacterianas por  $\text{cm}^3$ .

La colmatación química puede ocurrir lentamente y a largo plazo por interacción entre el agua de recarga y la del acuífero. Los diferentes motivos puede ser:

- A) Precipitación de carbonato de calcio.
- B) Precipitación de sales de calcio y magnesio, en superficie.
- C) Precipitación de hidróxidos de hierro y manganeso por mezcla de aguas reductoras y oxidantes.
- D) Cuando el agua es sódica, puede producir el hinchamiento de las partículas de arcilla por cambio iónico o su dispersión. Conviene que el agua de recarga mantenga una proporción mínima de Ca y Mg.

En resumen la calidad del agua de recarga, depende de:

- 1.- El Método de recarga.
- 2.- El uso a que vaya destinado el agua resultante.
- 3.- De la naturaleza del terreno que vaya a atravesar y de su capacidad de intercambio iónico.

En general el agua que se suministra a una instalación de recarga presenta características físicas, químicas y biológicas variables. Por esta razón, conviene tener en la entrada de las instalaciones de recarga:

- 1.- Dispositivos de pretratamiento que permitan realizar actuaciones sobre todas aquellas sustancias no desables que se desean eliminar o disminuir.
- 2.- Dispositivos de vigilancia y control que permitan rechazar o impedir la entrada a la instalación de recarga del agua que no puede ser tratada con un cierto grado de garantía.

En una instalación de recarga, los principales controles periódicos que se han de efectuar sobre el agua de recarga se centran en los siguientes aspectos:

- Composición fisico-química de los principales componentes:

Es importante hacer un análisis fisicoquímico al agua que se va a recargar, debido a que en ocasiones, solo se almacenará y con el tiempo los compuestos del agua pueden entrar en reacción con los componentes de la estructura de la roca.

- Compuestos nitrógeno y fósforo: Estos componentes son tóxicos a la salud, por lo que se debe tener cuidado con el agua a recargar ya que muchas veces se extrae agua del mismo acuífero para consumo de una región.

- Compuestos orgánicos: Es necesario evitar que el agua contenga microorganismos que puedan dar lugar a la formación de colonias de bacterias que obturan el medio poroso, impidiendo la infiltración del agua al acuífero, esto ocurre debido a las condiciones de presión y temperatura del medio.

- Metales pesados: En su recorrido el agua va adquiriendo minerales, es necesario un tratamiento previo antes de usarla para evitar alteraciones químicas.

- Bacteriología y Viriología: Todas las aguas están constituidas por bacterias y virus en cantidades aceptables. es necesario controlar éste porcentaje para evitar la colmatación.

- Elementos radiactivos: Es importante mencionar que el agua debe estar exenta totalmente de éstos elementos, ya que son dañinos tanto para la salud como para los sistemas de tuberías instalados a los cuales les puede provocar corrosión.

#### IV.2 COLMATACION

Con toda seguridad el mayor problema con el que se enfrenta la recarga artificial de acuíferos es la colmatación, entendiéndose por tal el proceso de acumulación de materiales en las proximidades de la superficie de entrada del agua. Su efecto es una reducción de la capacidad de infiltración.

La colmatación puede ser debida fundamentalmente a:

- Efectos Mecánicos: Los materiales arrastrados por el agua penetran por los poros, fisuras e intersticios del terreno, formando una capa o película de lodos que reducen la permeabilidad.

En los sistemas de recarga en profundidad (sondeos de inyección) se produce en el acuífero una entrada de aire y de gases que se encuentran disueltos en el agua de alimentación. Estas burbujas de aire y de gas se comportan en el terreno como si se tratara de verdaderos granos de materia sólida que se oponen al paso del agua.

- Actividad Biológica: Tiene lugar por el desarrollo de algas y bacterias en el agua, o en el fondo de los dispositivos de recarga, generalmente en las épocas del año de gran luminosidad y elevada temperatura como el verano.

En los sistemas de recarga en profundidad tiene una gran importancia la colmatación debido a la proliferación de bacterias, que se concentran fundamentalmente en el filtro.

- Procesos Químicos: Cuando el agua de recarga es inestable químicamente, o incompatible con el agua del medio saturado o no saturado de la formación permeable a recargar, se producen precipitados que dan lugar a la formación de una costra que reduce la permeabilidad.

Las principales acciones que pueden tomarse para prevenir la colmatación de acuerdo al tipo que esta sea son:

- Colmatación por Materias en Suspensión (efectos mecánicos):

El tipo de acción es la decantación de las materias suspendidas en el agua de inyección, o de infiltración, mediante depósitos diseñados para éste fin.

Filtración del agua de recarga, a través de un filtro de arenas o gravilla, colocado en el fondo del depósito, o en el circuito exterior de toma de agua del sondeo de inyección.

- Colmatación por Algas:

El tipo de acción es: empleo de algicidas, que pueden estar contraindicados, ya que degradan la calidad del agua y, con mayor o menor intensidad, dificultan posteriores procesos de autodepuración.

Aumento de la altura de la lámina de agua para disminuir la intensidad luminosa y en consecuencia frenar el desarrollo de algas.

Modificación del sistema de recarga, cambiando los depósitos por canales, ya que gran parte de las algas que crecen en los depósitos son especies que viven en agua estancadas.

Alimentación intermitente de los depósitos, lo que frena el desarrollo de las algas por los frecuentes vaciados.

- Colmatación por Procesos Químicos:

La acción a seguir es: Para evitar este tipo de colmatación se realiza un pretratamiento del agua de inyección o de infiltración, mediante la adición de productos químicos que provoquen la formación de los precipitados en dispositivos ajenos a los de infiltración.

A pesar de la utilización de los dispositivos y procedimientos de lucha contra la colmatación enunciados anteriormente, se pueden presentar estos fenómenos. En estos casos es necesario proceder a la descolmatación periódica de las obras o al abandono de las mismas.

La investigación práctica sobre ampliación de cuencas ha mostrado que la precisión del comportamiento analizado, raramente se refleja en el trabajo real. Aunque los niveles de agua en estanques amplios son relativamente constantes, la razón de recarga declina casi invariablemente con el tiempo, como resultado de la deformación de sedimentos y arcillas sobre la base del piso de cuenca y el crecimiento de microorganismos que obtaculizan los poros del suelo. En suma el entrapamiento de alre disuelto en el agua, obtura los espacios vacíos de la formación retardando el gasto de recarga. La desecación impide el crecimiento de microbios y hasta puede destruirlos, por eso en tiempo de secas se reabren los poros del suelo.

Los procedimientos de descolmatación más utilizados en resumen son:

- Dispositivos de Recarga en Superficie.

Dejar secar la instalación de recarga:

Esto contrarresta el hinchado de las arcillas, restituyendo así parte de la permeabilidad. En ocasiones se deja crecer vegetación cuyas raíces perforan y rompen la zona colmatada, facilitando así el posterior paso del agua.

Escariado de la parte colmatada.

Cuando la penetración de liaos es poco profunda se puede proceder a eliminar la zona colmatada, lo que es preferible hacer manualmente con rastrillos, puesto que las máquinas pueden alterar la disposición del filtro o del terreno natural compactándolo.

Extracción de la zona colmatada y posterior lavado.

Cuando la colmatación es profunda, se puede proceder a retirar dicha zona (filtro de arenas y/o terrenos naturales), para que, tras su lavado, pueda reintegrarse a su lugar e iniciar un nuevo ciclo de recarga.

- Dispositivos de Recarga en Profundidad.

El método más usual de colmatación es el bombeo intenso, a veces intermitente, a caudal superior al de recarga.

Una vez hecho este análisis, se puede observar que, en algunos casos los beneficios que una recarga representa, pueden ser dañinos en otro tipo de recarga, por tal motivo debe dejarse claro que para poder elegir algún método de recarga, éste dependerá tanto de las condiciones climatológicas del lugar, como de las características geomorfológicas y además de un factor importante, el costo. Esto debe contemplar el tipo de uso que se le vaya a dar al agua extraída y el comportamiento de recarga del acuífero.



## CAPITULO V

### REGIONALIZACION DE LOS EFECTOS

En todo sistema de recarga artificial, se presentan efectos, tanto benéficos como perjudiciales en el terreno.

Para poder extraer agua del subsuelo es necesario hacer un análisis concienzudo, de los efectos que ésto podría originar. Se puede decir que están en función directa del tipo de material que se trate y sus propiedades físicas.

Ha sido necesario para este estudio, considerar acuíferos homogéneos, isotrópicos, propiedades elásticas, plásticas y la velocidad con la que circula el agua (filtración), en el medio poroso, etc; todo ello para observar el efecto que tiene cada concepto sobre una región determinada.

Debido a la extensión de los acuíferos, se deben tomar en cuenta efectos superficiales como pueden ser hundimientos de terrenos, algunas cavidades en el suelo, etc, para evaluar los daños que la sobreexplotación de un acuífero sin su debida recarga puede provocar.

## V.1 EFECTOS ELASTICOS Y PLASTICOS

Se entiende por plasticidad a la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse.

Existen suelos que al ser remodelados, cambian su contenido de agua si es necesario, adoptan una consistencia característica y se ha denominado plástica. Se ha reconocido que existe una relación específica entre plasticidad y las propiedades fisicoquímicas, determinantes del comportamiento mecánico de las arcillas, ya que está probado que la plasticidad de un suelo es debida a su contenido de partículas más finas de forma laminar. Ya se ha visto que la forma laminar ejerce una influencia importante en la compresibilidad del suelo, mientras que el pequeño tamaño propio de esas partículas hace que la permeabilidad del conjunto sea muy baja.

Para conocer la plasticidad de las arcillas se han desarrollado varios criterios; en este trabajo solo se mencionará que Atterberg hizo ver que, la plasticidad no era una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua. Una arcilla muy seca puede tener la consistencia de un ladrillo, con plasticidad nula, y esa misma, con gran contenido de agua, puede presentar las propiedades de un lodo semiliquido o, inclusive, las de una suspensión líquida. Entre ambos extremos existe un intervalo del contenido de agua en que la arcilla se comporta plásticamente.

Se dice que una masa de suelo está en equilibrio plástico si cada punto de la misma se encuentra al borde de la rotura. Rankine (1857) investigó los estados de tensión correspondientes a aquellos estados de equilibrio plástico que se producen simultáneamente en todos los puntos de una masa seminfinita de suelo sujeta solo a su propio peso.

Los estados de equilibrio plástico similares a los considerados por Rankine se denominan estados de equilibrio plástico de Rankine.

Los estados de Rankine, se producen cuando todo el material de una masa seminfinita de arena se comprime o expande uniformemente, y se denominan estados generales de equilibrio plástico. En un estrato real de arena no es posible producir un estado general de equilibrio plástico, a menos que el mismo derive de fenómenos geológicos, como pueden ser la compresión horizontal de la base rocosa de una capa de arena por fuerzas tectónicas. Efectos locales tales como el desplazamiento de muros de sostenimiento, no producen cambio radical alguno en las tensiones interiores de la arena, salvo en las cercanías inmediatas a la fuente de los fenómenos. El resto de la masa de arena permanece en estado de equilibrio elástico.

El estudio del flujo de agua inestable, como ocurre en suelos compresibles, conecta la teoría del movimiento del agua con la mecánica de suelos. En algunas áreas de la ciencia, los problemas relacionados al flujo inestable de agua en medios porosos ha recibido considerable interés.

El primer hidrólogo Meinzer (1928) prestó atención al comportamiento elástico de los acuíferos. Sin embargo la formulación matemática de la teoría fue dada por Jacob (1940), que ahora es el tratado clásico del "Flujo de Fluidos a través de Medios Porosos Homógenos".

Por otro lado, en mecánica de suelos fue Terzaghi (1973) quien realizó el efecto de la disipación del agua en el poro sobre la deformación de un suelo saturado. El proceso es llamado consolidación. En el desarrollo original de esta teoría, la deformación y el flujo de agua ocurren solamente en una dirección. Terzaghi notó el parecido de la ecuación diferencial con la ecuación de difusión térmica en una dimensión.

Desde entonces la ecuación de difusión térmica ha sido estudiada extensivamente en la literatura, los problemas de consolidación en una dimensión son resueltos de manera análoga a los problemas correspondientes de difusión térmica.

La extensión hacia tres dimensiones fue hecha primero por Rendulic (1936), quien asumió que la carga total en un material bajo una constante externa es independiente del tiempo, así se llega a la ecuación análoga de la ecuación de difusión térmica para tres dimensiones.

Biot explica que el comportamiento de la estructura del suelo es la de un material perfectamente elástico. Esto muestra que el comportamiento real de los suelos es más complicado que el comportamiento perfectamente elástico, por lo tanto esta teoría proporciona meramente una aproximación de la descripción del proceso de consolidación.

En la teoría del movimiento del agua subterránea generalmente se acepta que se puede despreciar la deformación horizontal con respecto a la vertical. Esto muestra que bajo este concepto la teoría de Biot se reduce a la teoría de Jacob. Sin embargo se argumenta que esa no es la razón física para el desvanecimiento de la deformación horizontal, por lo que el presente estudio de la teoría de Biot puede ser usada como punto de salida.

#### ECUACION BASICA DE ELASTICIDAD.

En esta sección se establece la relación entre el cambio elemental de volumen y la presión del fluido en el medio poroso.

De esta forma se considera un material compuesto por A (grava), B (líquido) y C (gas). Las densidades de los componentes se denotan por  $\rho_A$ ,  $\rho_B$  y  $\rho_C$ . La descarga de masa específica se denota como  $n_A$ ,  $n_B$  y  $n_C$ . Las descargas de masa específica son relacionadas con el volumen específico de descarga;  $q_A$ ,  $q_B$  y  $q_C$  con:

$$n_A = \rho_A q_A, \quad n_B = \rho_B q_B, \quad n_C = \rho_C q_C.$$

Si la porosidad del material se denota como  $n$ , entonces en el volumen elemental  $V$ , el volumen de espacio poroso es  $nV$  y el volumen de material sólido es  $(1-n)V$ .

Si el grado de saturación es denominado por  $S_r$ , entonces el volumen de líquido en el volumen  $V$  es  $S_r nV$  y el volumen de gas es  $(1-S_r)nV$ . Con la ayuda de esa expresión para el volumen relativo de los componentes del material, la velocidad de desplazamiento  $V_A$ ,  $V_B$  y  $V_C$  se puede relacionar con el volumen específico de descarga, ésto es:

$$q_A = (1-n)V_A, \quad q_B = S_r n V_B, \quad q_C = (1-S_r)n V_C$$

La densidad relativa  $\theta_i$  de la componente  $i$  es definida como la masa de la componente  $i$  por unidad de volumen total del material. De esta forma la densidad  $\rho_i$  es definida como la masa de la componente  $i$  por unidad de volumen de esa componente, las densidades relativas son:

$$\theta_A = (1-n)\rho_A, \quad \theta_B = S_r n \rho_B, \quad \theta_C = (1-S_r)n\rho_C.$$

## V.2 VELOCIDAD DE DESCARGA DE FILTRACION

Considerese un filtro de suelo como el de la figura 5.2.1 Se representa el suelo en sus dos fases de sólidos y vacíos. Obsérvese que en esta situación, el área disponible para el paso del agua es  $A_v$ , en lugar de  $a$ , tal como se supuso en la ley de Darcy. Si el flujo es establecido, sin embargo debe tenerse el mismo gasto en el tubo libre que el suelo; por lo tanto teniendo en cuenta la condición de continuidad puede escribirse:

$$A_v v_1 = A v$$

donde:

$$v_1 = \frac{A}{A_v} v$$

De la siguiente figura se tiene:

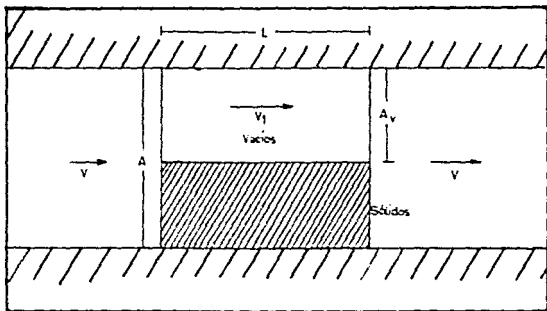


Fig. V.2.1

Considerando al filtro un espesor unitario al papel, se tiene:

$$\frac{A}{A_v} = \frac{1}{n} = \frac{1+e}{e}$$

donde:  $n$ : porosidad

por lo tanto:

$$v_1 = \frac{1+e}{e} v$$

La velocidad  $v$  que se deduce directamente de la ley de Darcy se llama velocidad de descarga o simplemente, velocidad.

La velocidad  $V_1$  que toma en cuenta la existencia de una fase sólida impermeable se llama velocidad de filtración y es la velocidad media de avance del agua en la dirección del flujo.

Sin embargo, en la obtención de la velocidad de filtración se supuso que el agua tenía trayectoria recta al pasar a lo largo del filtro, por lo cual no representa la velocidad con la que el agua se está moviendo. El agua no recorre la longitud  $L$  al atravesar el suelo, sino una línea sinuosa o irregular de longitud  $L_m$ . Entonces si  $V_2$  es la velocidad media real podrá escribirse:

$$V_2 = V_1 \frac{L_m}{L} = \frac{1+e}{e} \frac{L_m}{L} v$$

Una velocidad media más real podría encontrarse solamente si se conocen las variaciones del área de los poros en cada canal.

Como se ha observado, se puede conocer una velocidad de filtración. Esta representa solo una velocidad media o promedio, ya que considera que el agua recorre una trayectoria irregular, pero para que esta velocidad sea la real, se tendría que calcular la longitud total recorrida por el agua y el área de cada canal del medio poroso, lo cual resulta imposible y, por esta razón solo se usa velocidad promedio.

### V.3 HOMOGENEIDAD E ISOTROPIA

Si las propiedades de un material cualquiera son iguales en todos sus puntos, y la conductividad hidráulica es independiente de la posición dentro de la formación dicha masa se define como homogénea. Deberá admitirse que una capa de suelo nunca es verdaderamente homogénea.

En realidad la homogeneidad es una idealización de una masa de tierra (capa o estrato), para simplificar su análisis.

Cuando los valores de la conductividad hidráulica muestran generalmente variaciones a través de los espacios de una formación geológica esta propiedad es llamada "heterogeneidad". En realidad todos los acuíferos son heterogeneos, por tal motivo se harán comparaciones entre las dos propiedades.

Si se determina un sistema de coordenadas xyz en una formación homogénea, entonces  $k(x,y,z) = Cte$ . Si la formación es heterogénea  $k(x,y,z) \neq Cte$ .

Existen probablemente muchos tipos de configuraciones heterogéneas, un ejemplo común es en rocas sedimentarias, de tipo lacustre y depósitos marinos.

Se ha encontrado un fenómeno llamado homogeneidad dirigida, la cual se debe al proceso de sedimentación del material. Este fenómeno es posible en algunas formaciones geológicas, pero son particularmente comunes en deltas.

Greenkorn y Kessler (1969) definieron una formación homogénea como aquella que la función de probabilidad de la conductividad hidráulica es monomodal. Esto es, variaciones que se muestran en  $k$  pero mantienen un valor constante medio a través del espacio. Una formación heterogénea es definida como aquella en que la función de probabilidad de la densidad es multimodal.

Un depósito de suelo relativamente homogéneo es denominado capa o estrato.



ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Dentro de dicha capa pueden existir cientos de pequeñas capas diferentes, y la palabra estratificación se refiere a la condición resultante de la existencia de dichas capas. Si el material tiene propiedades iguales en todas las orientaciones de sus planos, es decir que la conductividad hidráulica es independiente de la dirección en un punto de la formación, entonces se le denomina isotrópica en ese punto.

Si la  $k$  varía con la dirección de la medición en un punto de la formación, ésta es anisotrópica en ese punto.

Si en un sistema coordenado  $xyz$  tal que el sentido de la dirección conocida con el sentido de la dirección principal de anisotropía, los valores de  $k$  en la dirección principal pueden ser especificados como  $k_x$ ,  $k_y$  y  $k_z$ . En un punto  $(x,y,z)$  en formación isotrópica se tiene  $k_x=k_y=k_z$ , como se presenta en depósitos sedimentarios acomodados horizontalmente, entonces la formación se considera transversalmente isotrópica.

Para un sistema homogéneo e isotrópico en dos dimensiones:  $k_x(x,z) = k_z(x,z) = C$ , para todo  $(x,z)$  cuando  $C=Cte$ . Para un sistema homogéneo anisotrópico  $k_x(x,z) = C_1$ , para todo  $(x,z)$ , sin embargo  $C_1 \neq C_2$ .

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A lo largo de este trabajo se ha hecho un análisis de la Recarga Artificial viéndola como una alternativa a los problemas de sobreexplotación de acuíferos.

Debido a la importancia que tienen los acuíferos en México -ya que se vive en gran parte de ellos- es necesario tomar en cuenta las siguientes recomendaciones para su mejor aprovechamiento y prolongar su utilidad.

1.- Cuando un acuífero está sobreexplotado, (es decir se extrae más de lo que naturalmente se recarga), es necesario conocer el comportamiento natural de éste, para saber cuando es conveniente una recarga artificial.

2.- Es importante conocer el patrón de flujo prevaleciente en ese medio poroso, para determinar las características de permeabilidad, porosidad, etc, que puedan ayudar a calcular el volumen de agua a introducir, y que el acuífero es capaz de retener o la cantidad que el puede aportar (gasto de agua).

3.- Deben concretarse los usos a los que este destinada el agua extraída, para poder determinar la calidad del agua a recargar.

4.- Para poder seleccionar el método de recarga que más convenga, debe hacerse el estudio de las condiciones del lugar y deben tomarse muy en cuenta los factores de comparación descritos en el Capítulo IV de este trabajo, para obtener buenos resultados. Además se deben acompañar los argumentos de selección del método con un análisis económico, que justifique su elección, en este trabajo el análisis de costos no es tema de discusión.

5.- Una vez seleccionado el método deben considerarse los efectos generales que la recarga pueda provocar en una región, tanto a nivel subsuelo como a nivel superficie.

En la actualidad muchos de los acuíferos de México son sobreexplotados, y se tienen deficiencias de abasto de agua en algunas regiones a consecuencia de este fenómeno. Por lo consiguiente deben realizarse estudios para tratar ya la recarga artificial como una solución viable a este problema. Deben darse los medios necesarios para la investigación de esta área ya que es necesario señalar que el presente trabajo ha sido realizado con todo el material que fue posible conseguir, ya que no existe mucha bibliografía al respecto y la que hay que es muy poca, no toca profundamente algunos temas que son de gran importancia.

Se habla muy poco de la recarga artificial y no con la importancia que se debiera, ya que en un futuro no lejano será una opción fuerte para eliminar muchos problemas.

Por esta razón esta tesis trata de ordenar las ideas existentes sobre el tema para dar una estructura más general de los que es y representa la Recarga Artificial de Acuíferos.

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

- 1.- Allan Freeze, R.  
Cherry, A. John  
GROUNDWATER  
Ed. Prentice Hall  
E.E.U.U. 1979
  
- 2.- Bear, Jacob  
HYDRAULICS OF GROUNDWATER  
Ed. McGraw Hill  
1979
  
- 3.- Castany  
TRATADO PRACTICO DE AGUAS SUBTERRANEAS  
Vol. I Ed. Omega  
España 1970
  
- 4.- Custodio  
TRATADO DEL AGUA SUBTERRANEA  
Vol. II Ed. Omega  
España 1972
  
- 5.- De Wiest, Roger J.M.  
FLOW THROUGH POROUS MEDIA  
Academic Press  
N.Y. 1969

- 6.- Juárez Badillo, Eulalio  
MECANICA DE SUELOS  
Vol. I Ed. Limusa  
México 1969
- 7.- Lerner, David  
Issar, Arie  
Simmers, Ian  
GROUNDWATER RECHARGE  
International Association of Hydrogeologists  
Vol. VIII Ed. Board  
1990
- 8.- Linsley, Ray k.  
HIDROLOGIA PARA INGENIEROS  
2a. Edición Ed. McGraw Hill  
México 1977
- 9.- Sharma, M.L  
GROUNDWATER RECHARGE  
Ed. AA Balkema/Rotterdam/Brookfield  
1989
- 10.- Taylor W, Donald  
FUNDAMENTOS DE MECANICA DE SUELOS  
Vol. II Ed. Continental  
Abril 1968, México

11.- Terzaghi

MECANICA DE SUELOS

Vol. I Ed. El Ateneo

España 1973

12.- Revista: INGENIERIA HIDRAULICA EN MEXICO

Instituto de Ingenieria, UNAM

Mayo - Agosto 1989

México

13.- Revista: TECNOLOGIA BASICA DE LA RECARGA ARTIFICIAL DE  
ACUIFEROS

Instituto GeoMinero de España

España, Oct. 1988