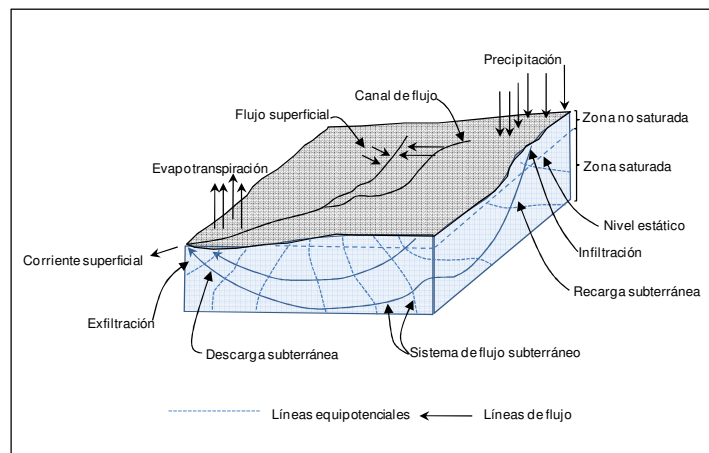


## 4 Proceso de infiltración de agua al subsuelo

### 4.1. Interacción entre el agua superficial y el agua subterránea

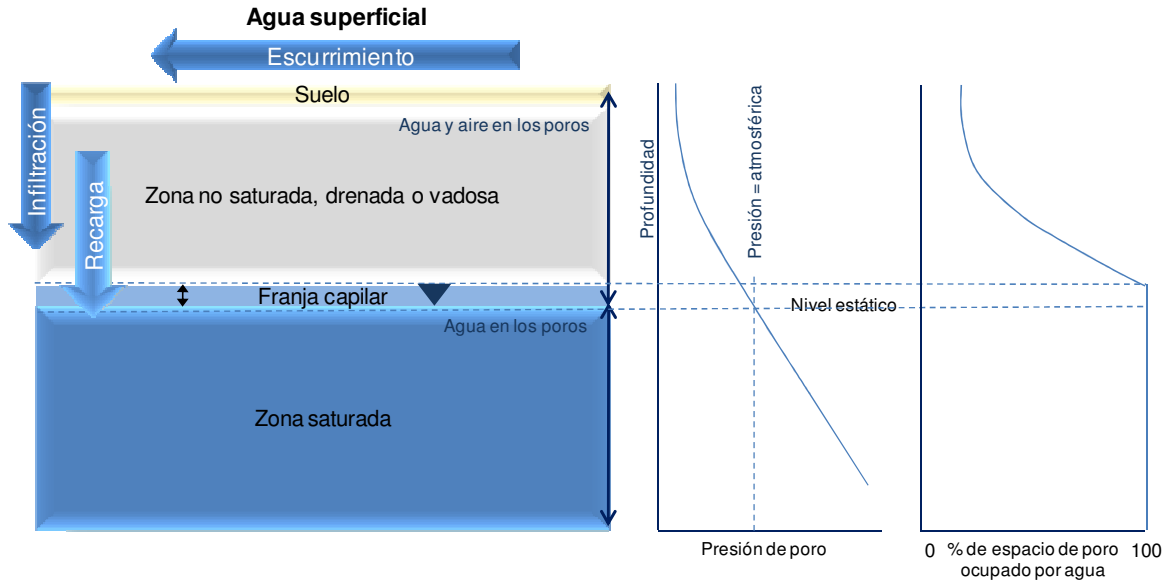
Para tener un buen aprovechamiento del agua debe entenderse el ciclo hidrológico, las partes que lo integran y los procesos que se llevan a cabo en cada uno de ellos. En la **Figura 4.1** se explica en forma gráfica.



**Figura 4.1. Ciclo del agua** (modificado de Freeze R. Allan, Cherry John A., (1974) Groundwater, Chapter 1 Introduction pag. 3 Figure 1.1)

Una diferencia entre las aguas superficiales y subterráneas es el tiempo de estancia en un sitio, mientras que las aguas superficiales escurren y transitan rápidamente a través de la superficie del terreno a zonas o cuencas topográficamente más bajas, las aguas subterráneas son más lentas, su velocidad depende del medio por el que transitan, tipo de roca y permeabilidad.

El agua subterránea se divide en dos zonas: la cercana a la superficie denominada como zona drenada o vadosa y la zona saturada o freática. Los límites entre ellas es el nivel estático, el cual se define como la superficie en la cual la presión del poro saturado con agua es igual a la presión atmosférica. En la **figura 4.2** se muestra la posición de cada una de estas zonas.



**Figura 4.2. Sección que muestra los términos usados para describir el agua subterránea**  
(modificado de Fitts Charles R., (2002) Groundwater Science)

La zona vadosa o drenada se localiza arriba del nivel estático, en ésta la presión de poro es menor a la presión atmosférica. Se caracteriza porque el espacio poroso contiene agua y aire, provocando que las fuerzas capilares atraigan el agua hacia la roca. El término agua vadosa se aplica a toda el agua que se ubica en la zona no saturada. Asimismo, los términos agua de suelo –*soil water*- o humedad de suelo –*soil moisture*-, también se aplican para la zona no saturada, es la parte donde se encuentran las raíces de las plantas.

Debajo del nivel estático se localiza la zona saturada, donde la presión del agua es mayor a la atmosférica y donde los poros están saturados con agua.

Se identifica una zona de transición entre la no saturada y la saturada denominada como franja capilar, es una zona saturada con agua que se localiza arriba del nivel estático, tiene un espesor que varía de acuerdo al tamaño del poro; en medios arcillosos puede llegar a tener hasta un metro de espesor, mientras que en gravas sólo llega a tener algunos milímetros.

En cuanto al agua superficial, el suelo es el medio que favorece que se infiltre o no al subsuelo, depende de su granulometría (sedimentos) o estructura (roca). En algunas ocasiones funciona como filtro, quedando en la superficie los sedimentos y el agua se mueve a la zona no saturada hasta llegar a la zona saturada, dependiendo de la permeabilidad.

En la **Figura 4.3** se muestran los flujos que afectan el agua subterránea y en la **Figura 4.4** los diferentes tipos de interacción que se presentan entre las aguas superficiales y subterráneas.

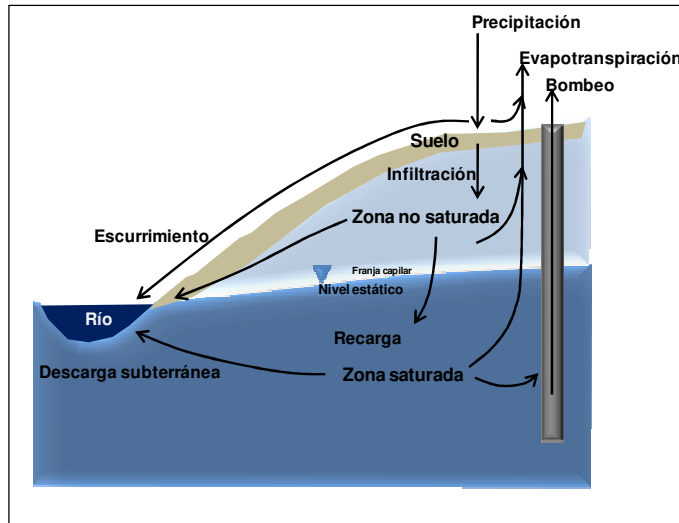


Figura 4.3. Flujos que afectan al agua subterránea (modificado de Fitts Charles R., (2002) Groundwater Science)

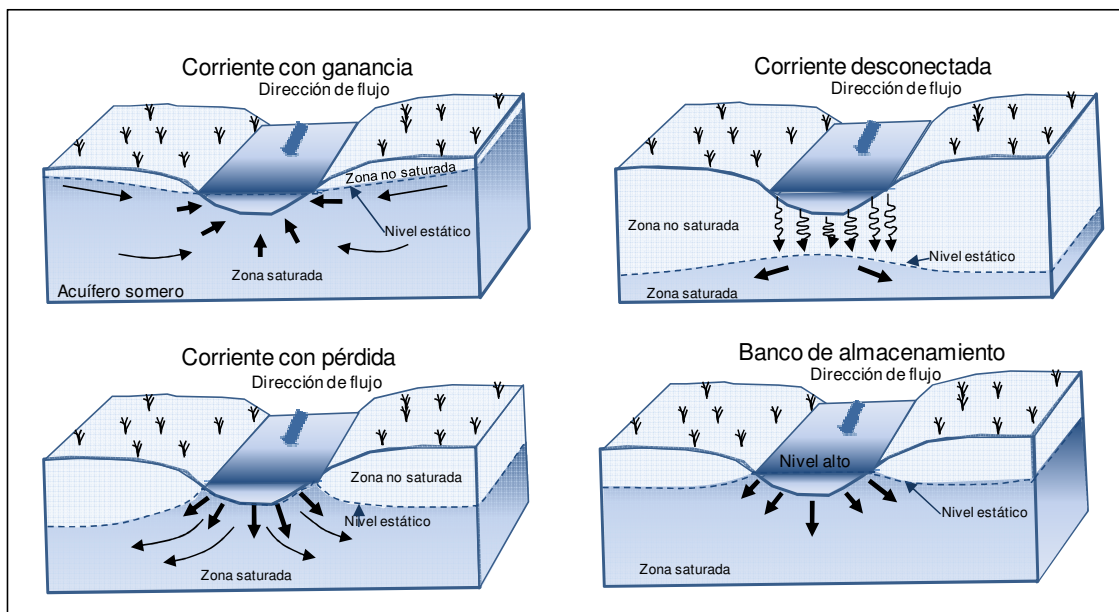


Figura 4.4. Tipos de interacción entre las aguas superficiales y subterráneas

## 4.2. Aprovechamiento del agua

La gestión del agua involucra el aprovechamiento de todas las fuentes de agua existentes. Como se presentó en el Capítulo 2, el conocimiento que se tiene del agua en el territorio del AVQ, está disperso, por un lado se conocen las condiciones hidrogeológicas que guarda el acuífero, también, se conoce el volumen de agua superficial que transita en él; en cuanto a su custodia, la mayor información la tiene la CEA, otra parte la CONAGUA y además, desarrolladores urbanos e industrias que han tenido que realizar estudios de factibilidad y perforación de pozos para contar con el vital

líquido. Cabe aclarar que en estos momentos la información que se cuenta no está actualizada, sin embargo, es suficiente para plantear la propuesta del presente trabajo.

La bibliografía sobre recarga de acuíferos menciona los procedimientos y actividades que se deben realizar para el proceso de infiltración. Esto es, se tiene la fuente, el agua que se acumula en la superficie, ya sea de lluvia o residual y el punto final, el acuífero. Sin embargo, en ningún estudio o bibliografía consultada se habla de la zona de transición entre la superficie y la zona saturada, en cuanto a la medición de la conductividad hidráulica o permeabilidad. Si bien, la normatividad mexicana relacionada con el caso que nos ocupa, indica una serie de acciones y requisitos que se deben cumplir para realizar la infiltración, todas ellas se enfocan al tipo y calidad de agua a infiltrar, NOM-014-CONAGUA-2003 y NOM-015-CONAGUA-2007; en ninguna de ellas se habla de la zona no saturada.

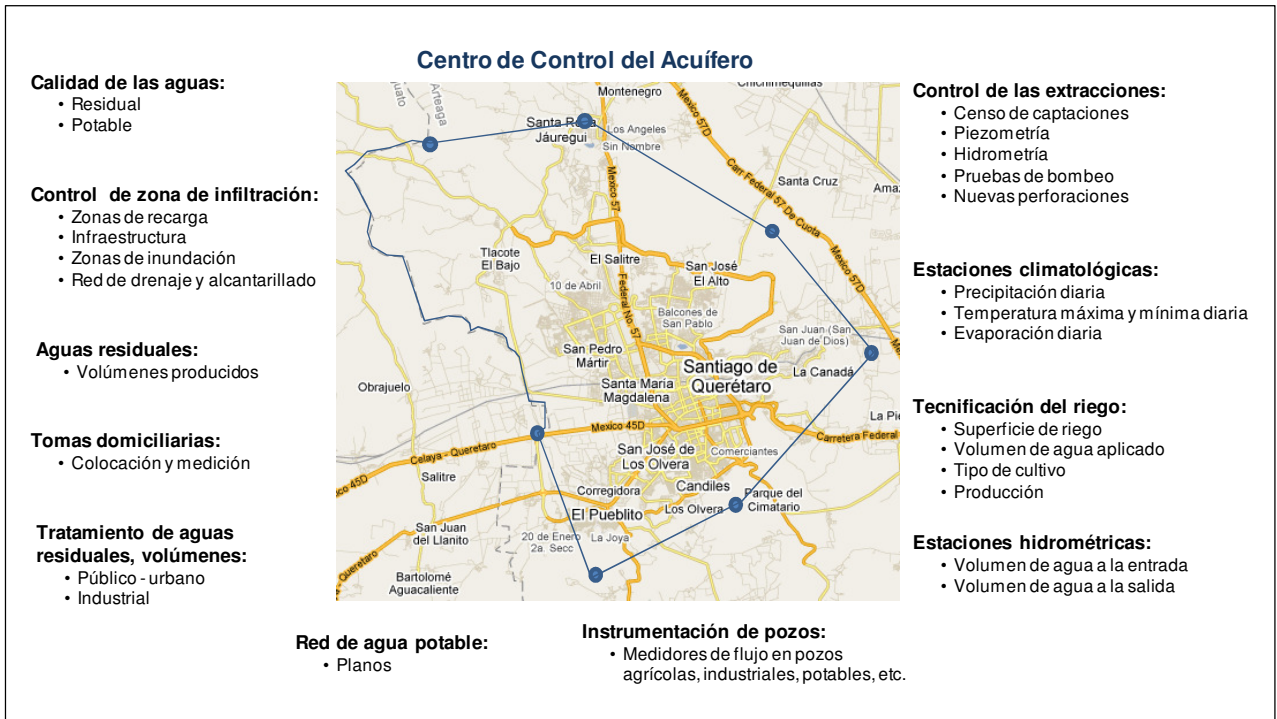
Una fuente de información importante de los acuíferos es la que se obtuvo en el momento de la construcción de los pozos, por mediciones periódicas de la profundidad del agua y por la obtención de propiedades hidrodinámicas en los afloros o pruebas de bombeo, los balances de agua subterránea y los cálculos de la disponibilidad.

En cuanto al agua superficial, las estaciones meteorológicas son la fuente de información principal para realizar los cálculos de avenidas y disponibilidad de agua superficial, así como los afloros de las corrientes superficiales. Toda esta información como ya se mencionó está dispersa en diferentes instancias de gobierno, no tiene una periodicidad en la adquisición de datos que alimenten el conocimiento. La información sobre los cortes litológicos de los pozos generalmente es la descripción del perforador y no de un ingeniero geólogo. Se desconoce si el nivel freático se obtuvo en pozo con un cierto tiempo de reposo, inmediatamente después de apagar el equipo de bombeo, o bien aún funcionando, por lo que se tiene que tomar esa información con cierta reserva. En cuanto a las estaciones hidrometeorológicas, generalmente la obtención de la información no tiene continuidad. ¿Y el banco de resguardo de los datos e información? ¡No existe!

Lo anterior induce a tomar la información con reserva y se comprueba lo expuesto en el capítulo 2, en donde se menciona que no existe una instancia responsable que proporcione los procesos métodos para obtener los datos, que defina la periodicidad del monitoreo que permita tener el control del acuífero y sobre todo resguardarla.

En la **figura 4.5** se presentan en forma esquemática los datos que se deben mantener actualizados para tener el conocimiento integral del manejo del agua; en el capítulo 5 se detallan.

En lo referente al AVQ, al ser la extracción mayor que la recarga, no hay oportunidad de que el agua superficial llegue de manera inmediata al acuífero; existe un espesor de la zona drenada de más de 100 m, lo que genera compactación del terreno y cambio en los valores de las propiedades hidrodinámicas. En estos momentos es importante determinar si el proceso de recarga vertical aún se lleva a cabo, ya que cada año el nivel estático es más profundo, tiene una velocidad de abatimiento en promedio superior a los 3 m.



**Figura 4.5. Información necesaria para el control del agua y base para el proyecto de infiltración**

En lo relacionado con el agua superficial es una situación similar, no hay información continua y un responsable de mantenerla actualizada y que tome decisiones. El suelo juega un papel muy importante ya que es el medio y filtro principal para conducir el agua al subsuelo; sin embargo, en la mayoría de los casos al saturarse se vuelve un medio impermeable lo que incrementa el escurrimiento y el traslado de partes sólidas a posiciones topográficas más bajas. Esto ocasiona deterioro de la calidad del suelo al transportar una gran cantidad de materia orgánica y sedimentos, incremento de la salinidad, afectación a la infraestructura civil (obstrucción del drenaje) e inundaciones al no poder desaguar las tuberías, así como la afectación al medio ambiente.

El manejo ordenado del agua superficial pluvial permite reducir las pérdidas por evapotranspiración, control de avenidas, incrementar las reservas del agua subterránea. La utilidad del agua de lluvia, además del abastecimiento para la agricultura, se utiliza para la generación de energía y para consumo humano, situación que no se presenta en el AVQ, pero, puede utilizarse para incrementar el volumen de recarga del acuífero.

La recarga artificial de acuíferos es una técnica que permite aprovechar el agua superficial en beneficio de éstos, para ser utilizada como un bien para el ser humano. A pesar de considerarse como de reciente innovación, se tienen evidencias que en Grecia y en India filtraban el agua mediante cribas o filtros rudimentarios de grava y arena. En el año 1670 se identifica que en el agua habitan microorganismos, responsables de su contaminación y la filtración empieza a ser un proceso rutinario. Se sabe que en el año de 1804 se diseñó la primera planta de tratamiento en Escocia, consistente en un filtro lento de arena. En 1854 se empieza a añadir cloro al agua. En 1906 se empieza a utilizar el ozono. Muchos de estos procesos se aplicaron para retornar el agua a los acuíferos.

No es hasta la década de 1970, cuando empiezan a aflorar nuevos contaminantes producto del desarrollo e innovación en la actividad industrial y agrícola. Se utilizan técnicas de aireación, floculación y adsorción mediante carbón activado, más adelante se ocupan los procesos de membrana. Hoy en día la filtración de algunos contaminantes se encuentra controlada, pero todavía queda mucho por avanzar en aspectos como la eliminación de subproductos de desinfección, productos derivados de medicamentos, grasas, aceites y elementos radiactivos, entre otros.

Si bien hasta ahora se ha mencionado que el agua de lluvia es la más viable para infiltrarla, no hay que dejar de tomar en consideración las restricciones que se tienen en cuanto a la normatividad NOM-CNA-11-2001 sobre la disponibilidad y en donde se debe considerar el libre tránsito de agua tanto superficial como subterránea hacia las cuencas aguas abajo.

### 4.3. Aspectos hidrogeológicos

La recarga natural es una parte del proceso del ciclo del agua que se genera como consecuencia de la diferencia existente entre las entradas de agua al suelo (precipitación, infiltración, entradas subterráneas) y las salidas (evapotranspiración, bombeo, salidas subterráneas y escurrimiento).

En el AVQ se tiene un volumen de recarga estimado de  $70 \text{ Mm}^3/\text{año}$  (entradas subterráneas,  $27 \text{ Mm}^3/\text{año}$  + retorno por riego,  $4 \text{ Mm}^3/\text{año}$  y recarga vertical,  $39 \text{ Mm}^3/\text{año}$ ). Para el caso que nos ocupa el retorno por riego y recarga vertical son los que interesan. Cabe mencionar que estos valores fueron calculados con base en el balance de aguas realizado en el año 1997 (GUYSA, 1997). Dado que la mancha urbana ha crecido es de esperarse que este valor se haya reducido de manera considerable.

Por otra parte, se ha caracterizado el acuífero con base en unidades hidrogeológicas, en donde se cuentan con valores de conductividad eléctrica, conductividad hidráulica y transmisividad, que son parámetros indispensables para conocer la movilidad del agua en el subsuelo. Asimismo, se ha cuantificado un valor del coeficiente de almacenamiento que es acorde al tipo de rocas que se encuentran en el subsuelo. Para la zona drenada, no se tienen valores actualizados, se tiene una idea de cómo se puede transmitir el fluido de acuerdo a la información histórica de algunos cortes y resultados de pruebas de bombeo cuando la zona estaba saturada.

En el aspecto de recarga inducida, ésta se puede llevar a cabo mediante la construcción de pozos y por obras de ingeniería civil que permitan reducir la velocidad de escurrimiento y captar mayores volúmenes de agua para conducirlos al subsuelo.

La recarga incidental se da por motivos de la actividad humana que no están encaminados a la recarga del agua subterránea, sin embargo, la favorecen. La depuración de aguas residuales mediante fosas sépticas, el drenaje de los campos irrigados o la recarga debida a la urbanización constituyen algunos ejemplos. La urbanización produce un mayor escurrimiento y elimina la evapotranspiración debido a la impermeabilización del suelo.

Otra forma de recarga, es la captación de agua que se puede obtener de los techos de las casas habitación, centros comerciales e industrias y canalizarla a depósitos para

realizarles un tratamiento e infiltrarla al subsuelo. Esta manera de captar el agua y conducirla al acuífero no requiere de tratamientos especiales para eliminar contaminantes y si apoyaría en la reducción de volúmenes de escurrimiento y evitar, entre otras, inundaciones en las partes con topografía baja, además, reduce considerablemente la erosión de suelos. (Bhattacharya&Rane, 1999).

La recarga artificial, según Custodio (1986) es *"la ciencia y el conjunto de técnicas que permiten aumentar la disponibilidad de agua subterránea, con la calidad apropiada a los usos a la que se destina, mediante una intervención consciente, directa o indirecta, en el ciclo natural del agua"*. Se puede llevar a cabo partiendo de diferentes fuentes de agua como: ríos, presas, acuíferos, acueductos, alcantarillado, zonas de cultivo, plantas de tratamiento de agua potable, plantas de tratamiento de aguas residuales, captación de aguas de los techos de las construcciones, entre otras. Los objetivos que se pretenden con la recarga artificial son:

- Incrementar y almacenar la cantidad de agua subterránea disponible para favorecer una mayor extracción.
- Reducir o eliminar el descenso del nivel del agua subterránea y, en su caso, elevar los niveles para reducir el costo de extracción y/o mantener los caudales de explotación.
- Conservar y/o eliminar agua de escurrimiento contribuyendo al control de avenidas de agua extraordinarias.
- Compensar la pérdida de recarga natural al acuífero, que se puede producir a causa de actividades humanas, tales como encauzamientos, derivaciones de agua, urbanización, construcción de obras civiles y otras formas de modificación del uso del terreno.
- Mejorar las condiciones para el uso integral de aguas superficiales y aguas subterráneas.
- Evitar que aguas de inferior calidad existentes en el acuífero o que se producen por contaminación, se desplacen hacia las captaciones de agua de buena calidad, o bien, tratar de desplazar esas aguas indeseables hacia otras partes.
- Acelerar el lavado de ciertas sales y productos, aumentando el flujo en el acuífero, para así, reducir el tiempo de residencia del agua y de las sustancias indeseables en el medio.
- Efectuar un tratamiento físico, químico y biológico del agua en el propio terreno.
- Recuperar aguas residuales, en general, después de un tratamiento previo suficiente, almacenándolas y completando el tratamiento depurador en el terreno.
- Reducir, aminorar o eliminar fenómenos de subsidencia a causa de la explotación intensiva de las aguas subterráneas.
- Compensar los efectos negativos que puedan producir obras hidráulicas de superficie y obras civiles sobre los acuíferos.

Para el caso del AVQ, una parte de la recarga artificial está orientada a aprovechar el agua de lluvia para almacenarla y evitar perderla por evaporación, inundación o escurrimiento.

## 4.4. Formas de recarga

La recarga de un acuífero se encuentra condicionada por diversos factores de carácter geológico, climático, de ocupación del terreno, morfológico, topográfico, de calidad del agua disponible, del costo del agua, administrativos y legales, entre otros.

Tal es la cantidad de factores que influyen y en grado tan diverso que es necesario aplicar varias modalidades de recarga para tener el control y aprovecharla eficientemente. Para este trabajo se considera un criterio, el propuesto por Custodio (1986), sobre los tipos de recarga que se pueden presentar ya sea superficiales o subterráneos.

### 4.4.1. Superficiales

La característica principal para esta forma de recarga es la creación de una lámina de agua libre. Es en esta zona donde se produce una columna de agua necesaria y con la presión suficiente para que esta se infiltre; puede ser a través de cualquiera de los siguientes medios:

- **Embalses o lagunas:** Son obras generalmente alargadas, aunque no siempre, poco profundas y de gran superficie, con o sin fondo artificial de grava o arena. La infiltración se realiza predominantemente por el fondo. Pueden estar tanto dentro como fuera de los cauces de ríos. A veces no hay salida de agua, infiltrándose todo lo que llega. Normalmente se disponen dos presas; en la primera se produce la sedimentación de las partículas en suspensión, de manera que se reduzca la sedimentación en la segunda.
- **Canales, zanjas y surcos:** Suelen construirse siguiendo la topografía del terreno, en general, con agua circulante hasta que se infiltra totalmente o hasta que sale la porción residual no recargada. Suelen ser poco profundos, la infiltración se produce por el fondo y también por los lados, con importancia variable dependiendo de su ancho. A veces pueden ser zanjas que contienen un tubo perforado que conduce el agua y un relleno de grava. Son recomendables en terrenos inclinados.
- **Fosas: En estas obras,** la superficie lateral es importante en relación con la del fondo, de manera que domina la infiltración por los flancos.
- **Áreas de extensión de agua:** El agua se puede extender bien por inundación directa o en forma de riego con elevadas dotaciones superficiales. En ocasiones, en zonas áridas van unidas a obras extensas de recolección de aguas de escorrentía, a veces con cuencas de muchas decenas de km<sup>2</sup> o a sistemas de control de la erosión de torrentes. A veces se aprovecha el lecho de un río, opción especialmente aconsejable en zonas de alta capacidad de transporte de sedimentos asociado a avenidas esporádicas.
- **Infraestructura civil sobre lechos de ríos:** Se realizan para aumentar o mantener la capacidad de infiltración, extendiendo la superficie mojada, aumentando la rugosidad del lecho (mediante gaviones); en general, dejando suficiente velocidad al agua para que arrastre la materia en suspensión hacia aguas abajo.



#### 4.4.2. Subterráneos

Las obras en profundidad disponen de mucha menor superficie para la recarga. En esta situación el área se limita, tiene que ser más puntual, lo que involucra tener un conocimiento más a detalle de las condiciones del subsuelo, entre otras cosas se consideran:

- Pozos de inyección, llegan al nivel de saturación.
- Pozos de absorción, no llegan al nivel de saturación.
- Drenes y galerías, se construyen en el fondo de un canal por el que se introduce el agua. En general están por debajo o en el límite del nivel freático.
- Zanjas, se excavan de ser posible hasta el nivel freático y se rellenan con gravas.

#### 4.4.3. Ventajas y desventajas

Las obras superficiales presentan características distintas a las subterráneas, situaciones que las hacen más aptas para unos fines y menos para otras, entre las que destacan:

- Los métodos superficiales no pueden emplearse eficazmente cuando el terreno superficial es poco permeable, o entre la superficie del suelo y el acuífero existen niveles poco permeables. En estos casos son recomendables los pozos, aunque no pueden descartarse las fosas que penetran lo suficiente para atravesar esos terrenos poco permeables.
- Los métodos superficiales no se adaptan adecuadamente a terrenos accidentados.
- Los métodos subterráneos evitan problemas de pérdida de agua y aumento de salinidad por evaporación.
- Los métodos superficiales, si no son operados de forma adecuada, pueden presentar problemas estéticos y ambientales, tales como proliferación de insectos y roedores; pueden ser causa de enfermedades. En esta situación, se requiere de obras adicionales de ingeniería para aislar el sitio y evitar el contacto con la gente.
- Los métodos subterráneos requieren agua de buena calidad, muy limpia y/o sistemas muy efectivos de limpieza (debido a problemas de colmatación), con un costo de mantenimiento a veces importante.
- El precio y la disponibilidad del terreno juegan un notable papel en la selección del método. Terrenos baratos favorecen la recarga en superficie, si es viable, y terrenos caros favorecen la utilización de pozos.
- El grado de depuración conseguido en el agua recargada suele ser mayor en los métodos superficiales que en los métodos subterráneos, debido en parte al encharcamiento (que favorece la degradación en condiciones aeróbicas con tiempos de residencia del orden de un día) y los riesgos de contaminación del acuífero son menores. El paso por el medio no saturado y la formación de un filtro natural son decisivos para conseguir una buena eliminación de contaminantes.
- Las obras superficiales suelen requerir acondicionamientos previos del terreno para nivelarlo, retirar coberturas poco permeables o arcillosas, retirar o cambiar la

vegetación, construir diques resistentes, estables y no erosionables, etc. Además, de estructuras para el manejo y movimiento del agua.

- En circunstancias similares y para igual caudal de recarga, los pozos requieren menos superficie que las fosas, y éstas menos que las embalses, siendo la extensión y el sobre riego los métodos que ocupan más terreno.

## 4.5. Técnicas y diseños de recarga artificial

Existe un amplio espectro de técnicas que se aplican para la recarga, cada una tiene un objetivo y aplicación, para el caso del AVQ es necesario identificar cuál aplica de acuerdo a la situación que se presente. Las técnicas se clasifican como:

### 4.5.1. Técnicas directas de superficie

- **Inundaciones**

Las inundaciones son un problema para las ciudades ya que afectan la infraestructura urbana y ocasionan grandes erogaciones económicas para el pago de indemnizaciones. Una forma de aminorar esta situación es la identificación de los sitios donde se acumula el agua superficial, estudios para definir las micro cuencas, tanto en la zona urbana como agrícola, y realizar obras de infraestructura para evitar que el agua llegue a estos sitios o bien realizar obras de infiltración. **Figura 4.6.**

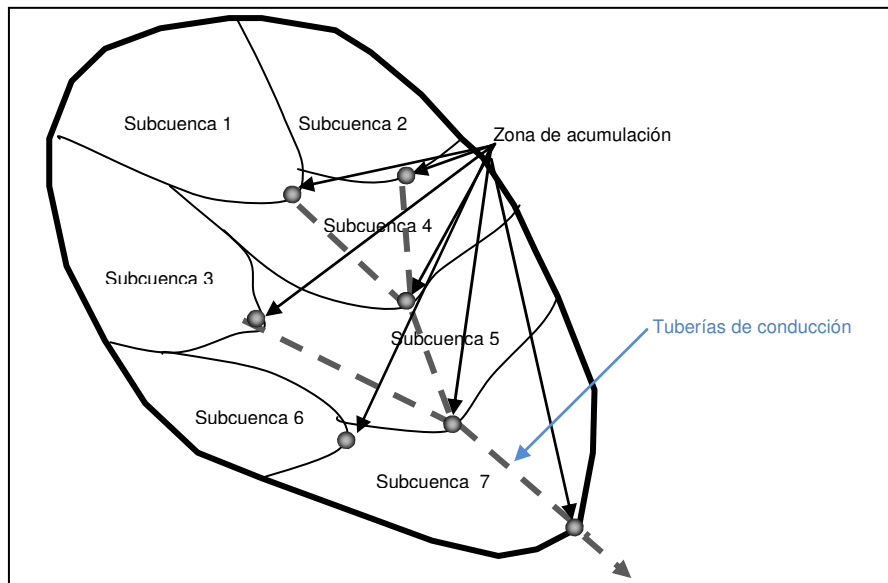


Figura 4.6. Definición de subcuencas y tuberías de desfogue

- **Bordos y drenes**

Hasta 1980 en el AVQ se aprovechaba el agua superficial a través de la construcción de bordos, los cuales constituían una fuente importante para la recarga al acuífero. En la actualidad existen 12 bordos, **Figura 4.7.** Asimismo se cuenta con un sistema de 17drenes, **Figura 4.8,** que cubren prácticamente a todo el acuífero. El problema que se

tiene con ellos es que favorecen más la evaporación y se pierde mucho volumen por esta condición, al tener un espesor de agua reducido y construirse en sitios con suelo impermeable.

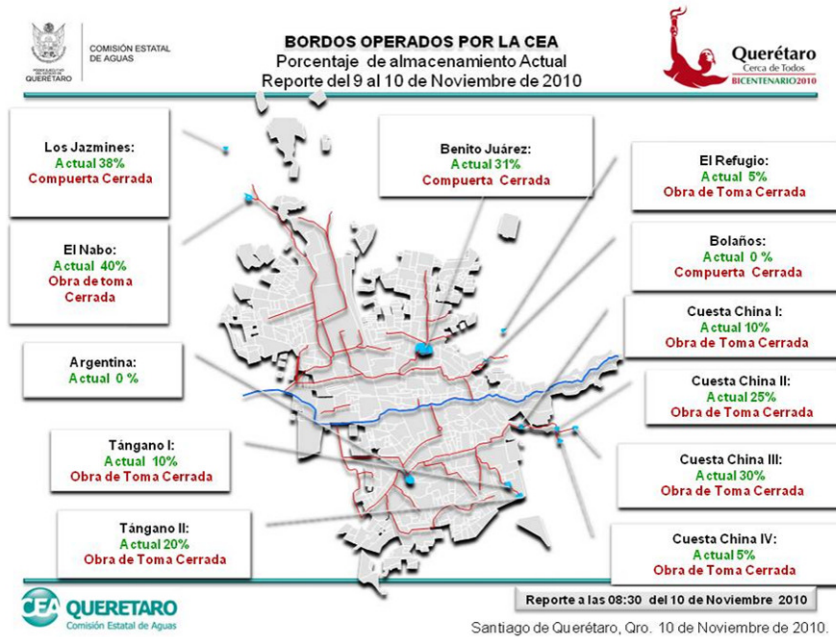


Figura 4.7. Bordos localizados en el AVQ (Imagen tomada del portal de la CEA)

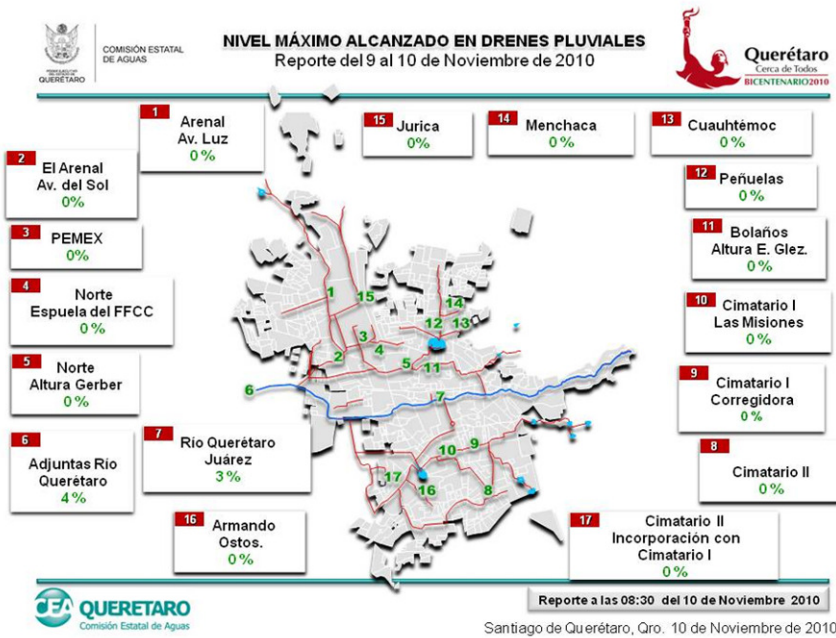


Figura 4.8. Drenes pluviales localizados en el AVQ (Imagen tomada del portal de la CEA)

- **Presas**

Este tipo de construcciones se efectúan para retener el agua y apoyar a los cultivos aguas abajo. Se construyen en suelos impermeables y se favorece la evaporación. En el AVQ existen dos presas la de Juriquilla, hoy en día con uso recreativo y menormente para riego de las pocas hectáreas que quedan aguas abajo de ésta. Y la presa El

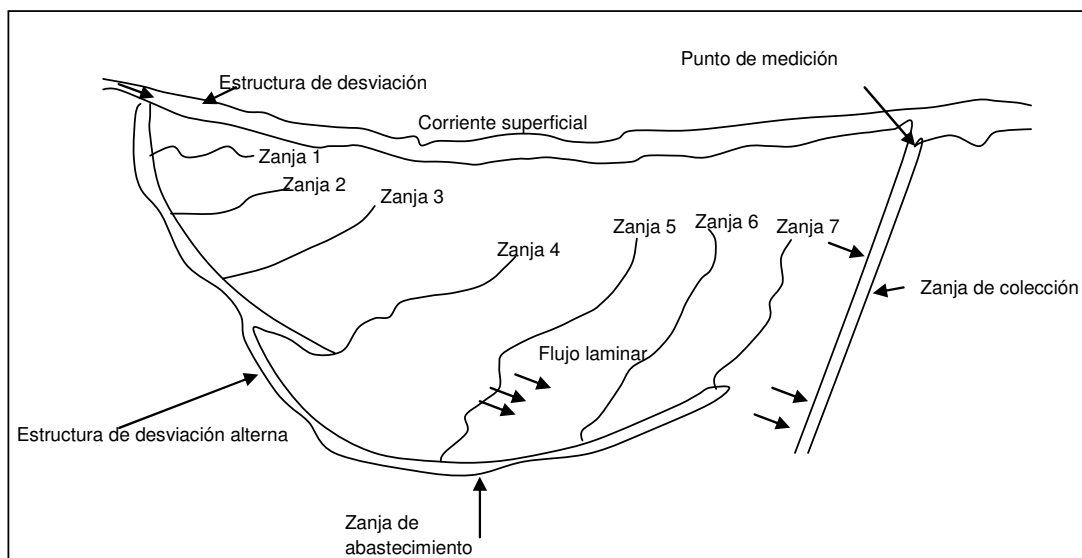
Batán que funciona como control de avenidas y para el riego de algunas hectáreas en la zona agrícola del municipio de Corregidora. **Figura 4.9.**



**Figura 4.9.** Fotografías de los dos almacenamientos superficiales que se encuentran en el AVQ (Presa Juriquilla y El Batán)

- **Zanjas y sistemas de surco**

Se construyen en áreas con topografía irregular, zanjas bajas, planas profundizadas y situados juntos o surcos que proporcionan el contacto máximo de agua con el área. En la **Figura 4.10** se muestra una forma de cómo distribuir las zanjas o surcos para aprovechar más el agua. Los tipos de zanjas pueden tener un patrón paralelo, dendrítico o de contorno.



**Figura 4.10.** Esquema para retener agua y favorecer la infiltración a través de zanjas y surcos

- (i) Aunque este método se adapta a terrenos irregulares, el contacto del agua con la superficie del terreno raras veces excede el 10% ciento del total del área de recarga.
- (ii) Las zanjas deben tener una pendiente para mantener la velocidad de flujo y un depósito de sedimentos mínima.

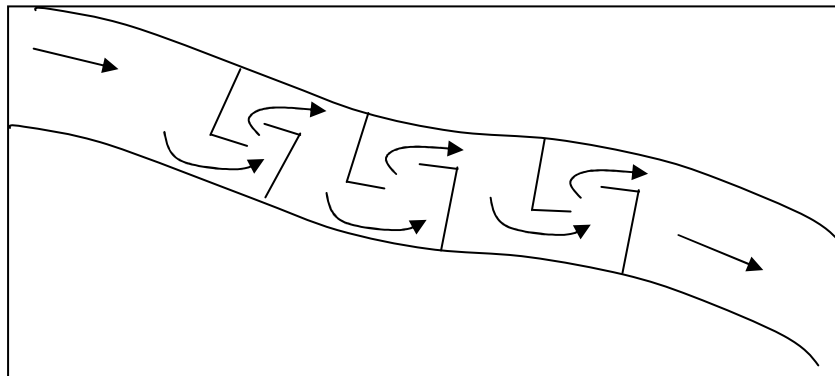
La zona donde se puede utilizar este tipo de infraestructura es al sur de la ciudad, en la parte correspondiente al cerro Cimatarío, siempre y cuando se identifiquen las corrientes superficiales que transitan por esa zona.

- **Sobre irrigación y fugas de agua**

Este problema se presenta cuando se riegan de más los campos de cultivo o bien los jardines de las casas en la zona urbana, esto genera un consumo adicional del agua, que la mayoría de las veces, además de evaporarse en las zonas de cultivo, se incrementa la salinidad del suelo, no favorece mucho a la infiltración. En cuanto a las fugas de agua, éstas pueden ser de agua potable y se generan por la ruptura de la tubería, o bien de agua residual, también por la ruptura de la red de drenaje. En el primero caso se pierden grandes volúmenes de agua, si son visibles, el agua se contamina y produce deslaves de suelos, si no son visibles se van directo a la zona drenada, pero puede afectar al subsuelo. Esta situación se presenta en el AVQ donde se han generado fallas inducidas asociadas a la explotación intensiva.

- **Gaviones**

Esto implica construir pequeñas estructuras en forma de 'L' en una corriente superficial, con el propósito de disminuir la velocidad del agua y favorecer la infiltración; sin embargo, si el agua trae mucho sedimento, también favorece el depósito de éste, lo que reduce la capacidad de infiltración. En la **Figura 4.11** se muestra un esquema. Requiere de mantenimiento permanente para quitar el azolve del cauce de la corriente.



**Figura 4.11. Esquema de una estructura tipo gavión**

También se pueden construir obras más sencillas como sería la utilización de malla de acero, en forma de bloques rectangulares colocadas en la corriente. **Figura 4.12.**

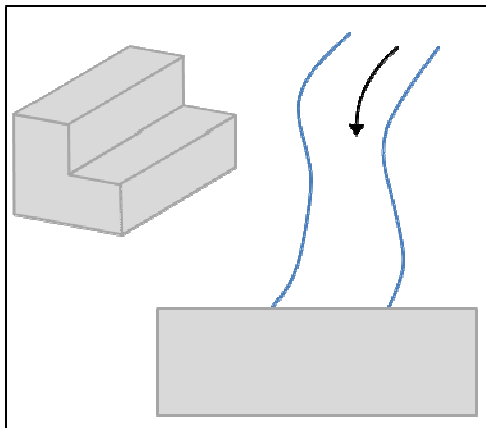


Figura 4.12. Otro esquema de una estructura tipo gavión más sencilla

Este tipo de estructura no es ya posible aplicarla en el AVQ ya que los ríos y arroyos que transitan por el área tienen un cauce muy reducido o bien ya no existen. El escurrimiento más grande que existe es el río Querétaro que funciona más bien como descarga de las aguas residuales de la ciudad.

#### 4.5.2. Técnicas directas en el subsuelo

Si bien el aprovechamiento del agua superficial, en el AVQ, a través de la construcción de obras como las mencionadas en el apartado anterior se ve restringido, es necesario identificar otras opciones como sería la parte de la zona drenada, aunque se reitera la poca información que existe. Sin embargo, se plantean algunas obras que se puede utilizar.

- **Pozos de inyección o pozos de recarga**

Los pozos de recarga vertical pueden ser con o sin inyección en el fondo.

##### **Agujero de infiltración**

- Adecuado para niveles de agua no muy profundos (10 a 20 m).
- Cuando hay presencia de un estrato de arcilla de por lo menos cinco metros.
- Efectivo en áreas con recarga vertical reducida.
- Aprovecha grandes cantidades de agua para recarga.
- Es efectiva con aguas que contienen limo (es necesario utilizar filtros de arena, grava y cantos rodados).
- La relación de la recarga depende del material del acuífero y del contenido de limo en el agua.
- Las características de este tipo de pozo se muestra en la **Figura 4.13**.

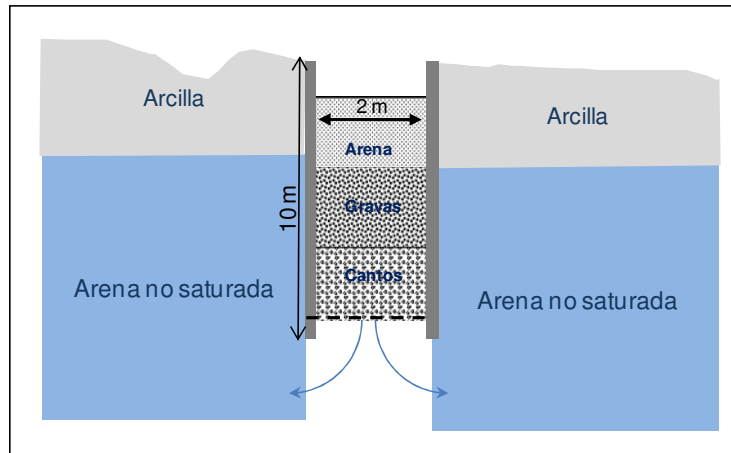


Figura 4.13. Esquema de un pozo de recarga

- **Agujero con pozo**

Consiste en construir un pozo de inyección con un diámetro determinado en el fondo de un agujero de diámetro mayor. En la **Figura 4.14** se muestra el esquema de este tipo de estructura.

- Adecuado para niveles de agua profundos, encima de 15 m del nivel estático y de preferencia que la última capa de este pozo llegue a un horizonte arcilloso.
- Cuando hay presencia de un estrato de arcilla de por lo menos 15 m antes de llegar al nivel estático.
- Puede colocarse sobre o debajo del nivel estático, en el segundo caso aplicando las normas que marca la CONAGUA.
- Su eficiencia es alta, siempre y cuando no se inyecte agua con sedimentos.
- Aprovecha grandes cantidades de agua para recarga.

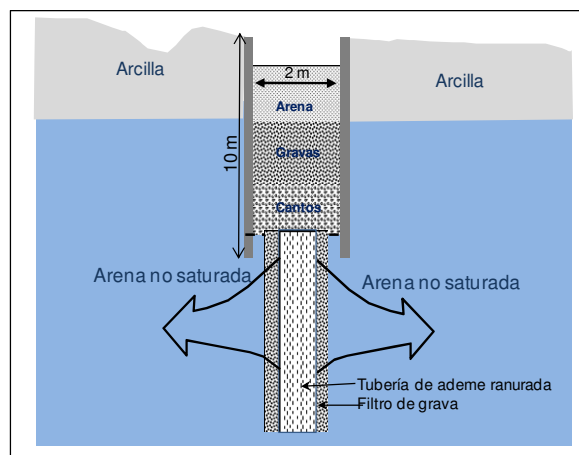


Figura 4.14. Esquema de un pozo de recarga con pozo de inyección

- **Pozos de recarga lateral**

Consiste de una trinchera de cuatro a ocho metros de largo por dos metros de ancho y de dos a tres metros de profundidad. Es semejante al agujero de infiltración, sólo cambian las dimensiones.

- Son adecuados cuando existen áreas permeables con horizontes arenosos debajo de los tres metros de profundidad.
- Si es factible construir pozos de inyección el esquema se presenta en la **Figura 4.15**.
- Existen volúmenes importantes de agua superficial.

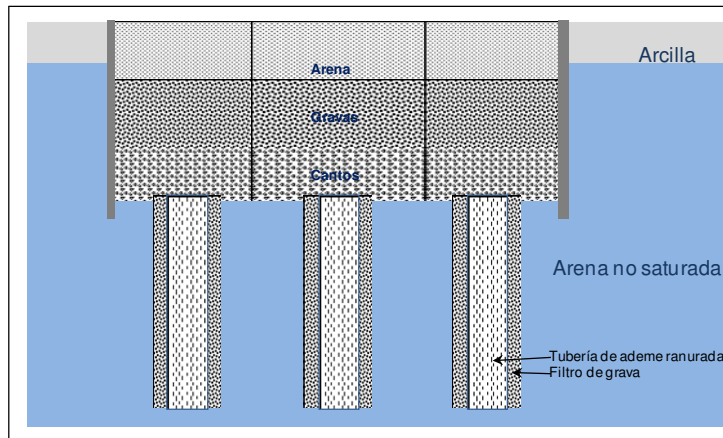


Figura 4.15. Esquema de un pozo de recarga con varios pozos

Para este tipo de casos, el agua proveniente de los techos de las casas, industrias y centros comerciales serían la fuente de abastecimiento principal, previo un tratamiento de las aguas para eliminar contaminantes.

- **Recarga artificial a través de pozos de inyección**

Los pozos de inyección son estructuras de diámetro pequeño (12" a 22" de diámetro) a través de los cuales se inyecta agua a presión para desplazarse en el acuífero. **Figura 4.16**.

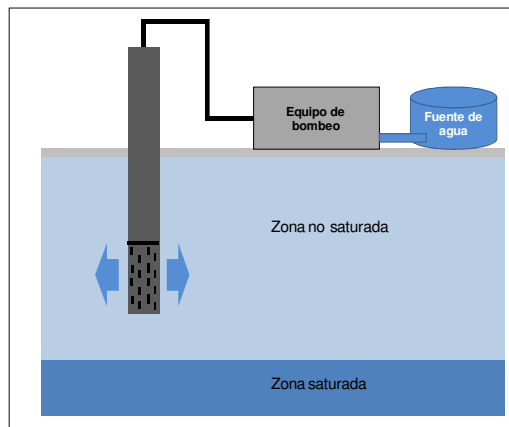


Figura 4.16. Esquema de un pozo de inyección



A través de esta técnica el agua se conduce de manera directa al acuífero evitando pérdidas por evaporación. Es muy efectiva en rocas fracturadas o rocas kársticas, sin embargo, es necesario asegurar la calidad del agua para evitar por un lado la obstrucción del pozo por bacterias, precipitación química o depósito de limos. La selección del sitio requiere de un conocimiento hidrogeológico a detalle.

La efectividad de la inducción del agua hacia el acuífero está condicionada por el bombeo, la permeabilidad, la distancia a la corriente superficial, el gradiente hidráulico y tipo de pozo. Requiere de mantenimiento periódico.

- **Recarga inducida**

Es un método indirecto que involucra bombeo desde un acuífero, hidráulicamente conectado con el agua de la superficie, para inducir una recarga a un lugar en particular. Cuando un cono de abatimiento intercepta una frontera de recarga de un río, por ejemplo, una conexión hidráulica se establece con la fuente superficial, la cual inicia proveyendo parte de la producción del bombeo. En este tipo de método no existe una construcción artificial. En la **figura 4.17** se muestra una de las tantas formas que se presentan. Para el caso del AVQ las dos corrientes de agua superficial quedan, hoy en día, a cuando menos 80 m de distancia de la zona saturada, lo cual implica que éstas deberían de funcionar como aportadoras de agua al acuífero. Hay que mencionar que el agua que transita por estas corrientes, es agua residual con un tratamiento mínimo, situación que debe contemplarse con un monitoreo sobre la calidad del agua en las captaciones cercanas para conocer si hay contaminación o no del acuífero; además, de identificar si existe un cuerpo arcilloso que funcione como filtro de estas aguas previo a su llegada a la zona saturada.

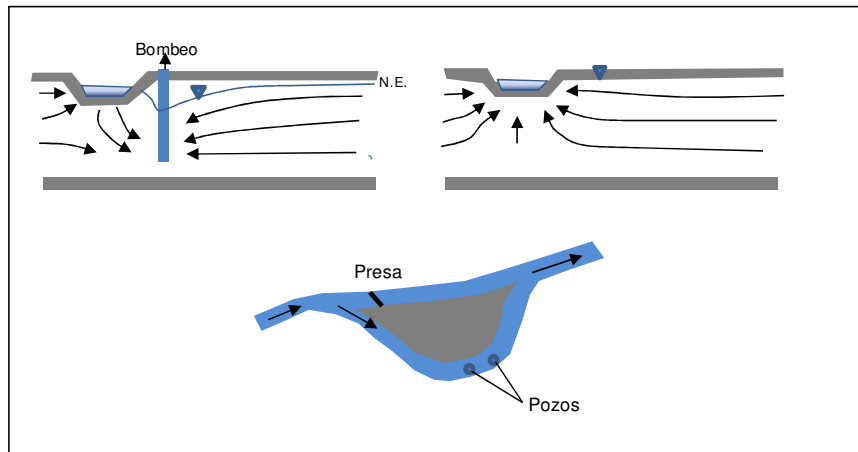


Figura 4.17. Recarga inducida

#### 4.5.3. Dificultades y retos en la estimación de la recarga

La cuantificación de la relación recarga natural – recarga inducida es un prerequisite necesario para la eficiente administración del recurso agua. Para zonas como el AVQ es indispensable conocerla, ya que es la llave para sustentar el desarrollo económico de la zona.

Hasta este momento se han presentado algunas formas en que se puede inducir el agua al subsuelo, no se ha hablado de un método que permita estimar la recarga, la realidad es

que cada zona en particular tiene que tratarse de acuerdo a las necesidades, disponibilidad y calidad de la información.

Los métodos para cuantificar la recarga son de tipo no lineal orientado a la recarga en función del tiempo, en la distribución areal, en la escasez de datos hidrogeológicos y en las complejidades que se planteen en la ecuación de balance.

Por estas consideraciones la propuesta de diseño de un programa de infiltración debe diseñarse con flexibilidad para no hacer cambios radicales al momento de ejecutar las obras, específicamente en el cálculo de los volúmenes disponibles para llevar a cabo este proceso.

#### 4.6. Métodos para estimar la recarga

La estimación de la recarga debe tratarse como un proceso permanente en el cual se estén adquiriendo datos relacionados con la disponibilidad y consumo del agua, para ello se requiere de varias técnicas de adquisición y cálculo. En el inciso 4.2 se habló de la necesidad de contar con información, así como el tipo de información mínima necesaria para llevar el control del acuífero y poder realizar los cálculos para determinarla. Asimismo, se requiere tener una buena conceptualización de los diferentes mecanismos de recarga y su importancia en el área de estudio.

Para identificar los probables mecanismos de flujo en un lugar específico, se requiere examinar las evidencias de campo detalladamente.

Una vez que el mecanismo de recarga se define, se deben realizar varias pruebas que permitan tener una idea más acertada del valor obtenido y tomar en consideración los siguientes cuestionamientos:

- ¿Cuánta recarga el acuífero puede aceptar? Un acuífero con disponibilidad y poca zona drenada no puede acumular más agua y buscará la forma de eliminar el volumen excedente.
- ¿Cuánta agua puede transmitir la zona drenada? Relaciones de alto potencial de recarga no pueden transmitir agua en estratos de baja conductividad hidráulica.
- ¿Qué otros factores se pueden considerar para incrementar la recarga?
- ¿Cuál es el potencial de recarga de la región?
- ¿Cuál es la recarga actual? Este punto considera el balance hídrico y los destinos del agua disponible.
- ¿Se hace comparación con otras estimaciones?

La llave para contar con un valor lo más acertado posible depende de la cantidad, calidad de los datos e información disponible. Esto significa la necesidad de realizar investigaciones múltiples organizadas y orientadas al objetivo principal, la recarga del acuífero.

Aunque no es el objetivo de este trabajo, es necesario plantear las técnicas que se utilizan para estimar el valor de la recarga, haciendo hincapié que por el tipo de estudios e información actualmente disponible en el AVQ, el método de balance integral de aguas subterráneas y superficiales es el valor que da una idea de la situación que guarda este acuífero en cuanto a la recarga.

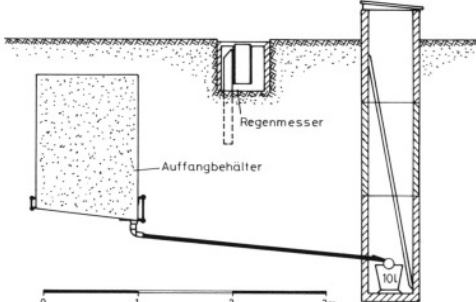
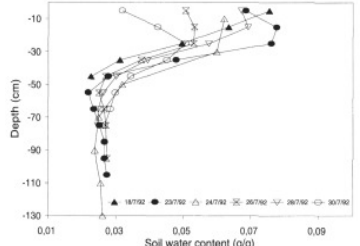
Debe realizarse de manera anual, ya que el crecimiento poblacional, el incremento de la mancha urbana y la disminución de la “probable” recarga, se requiere para hacer replanteamientos en cuanto a la planeación que se tiene para el desarrollo sostenido de la región a nivel federal, estatal y municipal.

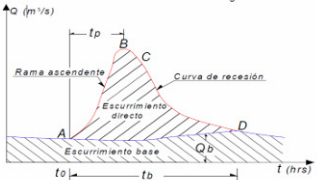
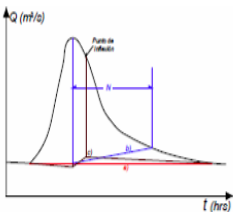
Los métodos de estimación de la recarga se dividen en:

- Mediciones directas.
- Balance de aguas.
- Métodos darcyanos. Estiman el flujo a través de la carga y conductividad hidráulica.
- Métodos de trazadores Se aplican tanto en la zona saturada como en la no saturada, pueden rastrear movimientos de agua sobre largos lapsos de tiempo.
- Métodos geofísicos.

En la **tabla 4.1** de detallan sus características y ventajas y desventajas.

**Tabla 4.1. Métodos para estimar la recarga**

Tipo	Formas de medición	Características:	
<p><b>Mediciones directas</b></p>	<p><b>Lisímetros</b></p>	<p>Es un instrumento que se usa para medir y monitorear el movimiento del agua y los compuestos químicos que se filtran en los suelos.</p> <p>Se utiliza para medir el contenido de agua de los suelos.</p>	<p><b>Medición:</b> <math>EVR = P - Q \pm VR</math>. Estimación del valor de la Recarga = Precipitación – Caudal/drenaje +/- Variación Reserva de agua.</p> <p><b>Ventajas:</b> Mide directamente la infiltración Es un buen estimador a profundidades superiores a 2 m. Caracteriza y evalúa la relación “agua - suelo - planta”. Calcula las necesidades de agua de cultivos bajo riego o no.</p> <p><b>Desventajas:</b> Los valores se afectan si el relleno es distinto a suelo natural, por textura, estructura, uso, compactación, porosidad, etc. Imposibilidad del movimiento horizontal del agua. Método laborioso y costoso. La medición de EVR es puntual.</p> 
	<p><b>Balance de humedad del suelo a través de sondas de neutrones o reflectometría en el dominio del tiempo</b></p>	<p>Método para determinar el contenido de agua en el suelo.</p>	<p><b>Ventajas:</b> Monitoreo de desarrollo temporal del contenido de agua en el suelo.</p> <p><b>Desventajas:</b> Se aplica sobre pequeñas muestras, alto costo.</p> 

Tipo	Formas de medición	Características:	
<b>Balance de agua</b>	<b>Balance de humedad de suelo</b>	Es un balance entre entradas y salidas de agua en el drenaje de una cuenca.	<p><b>Medición:</b> Descarga del drenaje de la cuenca = precipitación – evapotranspiración +/- cambio de almacenamiento en el suelo.</p> <p><b>Ventaja:</b> El cálculo es sencillo se puede realizar en hoja de cálculo.</p> <p><b>Desventaja:</b> Es un método poco confiable cuando se utiliza para el cálculo de la recarga (por la falta de información confiable sobre precipitación y evapotranspiración).</p>
	<b>Balance de agua en canales de los ríos</b>	Si la recarga está limitada a la infiltración de un canal de un río, las observaciones son sencillas. Se mide el flujo en dos puntos a lo largo del río, la diferencia del gasto se asocia a la infiltración.	<p><b>Ventaja:</b> Las mediciones del flujo del río son sencillas.</p> <p><b>Desventaja:</b> Las mediciones son inexactas y las diferencias pueden pasar desapercibidas en tramos cortos.</p>
	<b>Método de elevación del nivel freático</b>	Es el indicador más claro de la recarga en condiciones naturales del acuífero. Si se conoce el coeficiente de almacenamiento, la interpolación del cambio de elevación en el nivel estático se traduce en el volumen de recarga.	<p><b>Ventaja:</b> Es un método sencillo cuando se conoce la elevación del nivel estático de la superficie del acuífero.</p> <p><b>Desventaja:</b> Gran cantidad de mediciones y generalmente el acuífero no se encuentra en una cuenca cerrada o bien se desconoce el valor del coeficiente de almacenamiento.</p>
	<b>Método del flujo base de un río</b>	<p>Es el gasto existente en una cuenca producto del escurrimiento permanente y el escurrimiento subterráneo, que de manera más lenta llega hasta la salida de la cuenca, Se realiza a través del análisis de ideogramas, los métodos pueden ser:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Línea recta.</li> <li>• Flujo base fijo. Supone que el escurrimiento termina en un tiempo N, después del pico del hidrograma.</li> </ul> $N = 0.827 \cdot A^{0.2}$ <p>Donde N = tiempo de vaciado de la cuenca en días y A el área de la cuenca en km.<sup>2</sup></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pendiente variable. En el cual la curva de flujo base antes del escurrimiento se extrapola hacia adelante.</li> </ul>	<p><b>Ventaja.</b> Es el método más utilizado.</p> <p><b>Desventaja:</b> Se requiere de información continua.</p>  <p>Punto de levantamiento(A). Pico (B). Punto de inflexión (C). Final del escurrimiento directo (D).</p> <p>Tiempo de pico (tp). Tiempo base (tb). Escurrimiento directo.</p> 

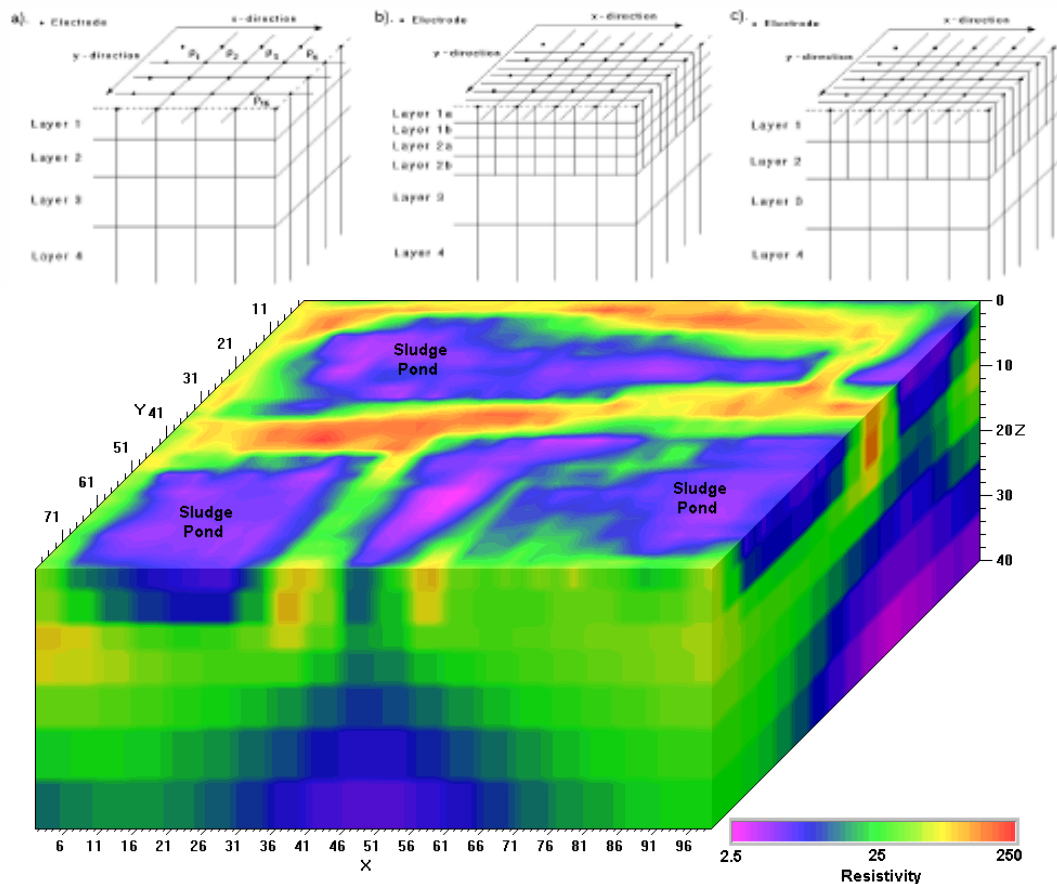
Tipo	Formas de medición	Características:	
	<b>Manantiales o curvas de flujo de ríos</b>	En este método se aplica término del paso de una corriente <b>extraordinaria</b> o de lluvia, los valores se grafican en un papel y tiene un comportamiento exponencial.	<p><b>Ventaja:</b> Es un método integrador. Se pueden utilizar cargas hidráulicas.</p> <p><b>Desventaja:</b> El método es sólo aplicable cuando hay manantiales o corrientes perennes, así como conocer la porosidad o coeficiente de almacenamiento.</p>
	<b>Relación lluvia-recarga</b>	Es una práctica común expresar la recarga como un porcentaje de lluvia. Sin embargo, no es claro identificar de dónde proviene esta consideración.	<p><b>Ventaja:</b> Es un método muy sencillo.</p> <p><b>Desventaja:</b> Para establecer esta relación se requiere de un método fidedigno para determinar la recarga.</p>
<b>Métodos darcyanos</b>	<b>Ley de Darcy en la zona no saturada</b>		<p><b>Ventaja:</b> Todas las incógnitas de la ecuación de Darcy son medibles.</p> <p><b>Desventaja:</b> La conductividad hidráulica del suelo no se conoce con exactitud debido a las heterogeneidades y varía con el grado de saturación.</p>
	<b>Ley de Darcy en la zona saturada basada en pruebas de bombeo y medición de cargas hidráulicas</b>		<p><b>Ventaja:</b> Todas las incógnitas de la ecuación de Darcy son medibles. La conductividad hidráulica es constante en un tiempo en el medio saturado.</p> <p><b>Desventaja:</b> La conductividad hidráulica no se conoce con exactitud debido a las heterogeneidades de la zona saturada.</p>
	<b>Modelo de flujo</b>		<p><b>Ventaja:</b> Utiliza mucha información y puede combinarse con un modelo de transporte de contaminantes.</p> <p><b>Desventaja:</b> Se requiere de la calibración del modelo. La calibración con cargas hidráulicas puede ser no única. Se pueden aplicar muchas combinaciones de relaciones de recarga y transmisividades.</p>
<b>Métodos de trazadores</b>	<b>Método de cloro</b>	<p>Se basa en el hecho de que el agua de lluvia contiene cloro. Durante la evaporación la concentración se incrementa.</p> <p>Es un buen medidor de flujo.</p>	<p><b>Ventaja:</b> El cloro es un trazador que indica evaporación.</p> <p><b>Desventaja:</b> Hay situaciones en que el método falla, específicamente cuando hay fuentes de cloro en el suelo.</p>
	<b>Método de tritio</b>		<p><b>Ventaja:</b> Es un marcador de tiempo debido a su decaimiento radiactivo. Se mueve con la molécula de agua y por tanto se utiliza para determinar edad.</p> <p><b>Desventaja:</b> La vida del tritio es de 13.2 años. Se requiere de conocer o tener una estimación de la porosidad. Es relativamente sencillo de aplicar en medios granulares y difícil en fracturados.</p>
<b>Otros métodos</b>	<b>Tritio-Helio</b>	Se basa en la composición isotópica del agua de	<b>Ventaja:</b> Es posible verificar la infiltración lateral a partir de

	<b>Carbono 14</b> <b>Cloro 36</b> <b>Bromuro</b> <b>CFC</b> <b>SF6</b> <b>Sensores remotos</b>	<p>lluvia así como del agua infiltrada. Conforme el agua de va evaporando la concentración de isótopos aumenta. Son concentraciones tan bajas que solo se pueden medir gracias a la radioactividad de los mismos.</p> <p>Proporcionan información sobre el tiempo de tránsito o de renovación del agua.</p>	<p>ríos, lagos ó infiltración vertical de agua estancada.</p> <p><b>Desventaja:</b> Registra cualquier variación climática durante el tiempo de recarga</p>
--	---	---	---

- **Métodos geofísicos**

Este método se tratará de manera independiente a lo ya expuesto, consiste en obtener una imagen eléctrica del subsuelo en cuatro dimensiones, esto es, considera el cuerpo o la zona donde se pretende evaluar la infiltración y el tiempo de ejecución, el cual considera realizar medidas en determinados horizontes de tiempo para ver el comportamiento de la resistividad de una zona cuando se le inyecta agua o una solución salina.

Esta técnica se aplica para delimitar plumas de contaminación, sin embargo, puede utilizarse para conocer el movimiento del agua subterránea hacia el subsuelo. En la **Figura 4.18** se muestra un bloque donde se observan diferentes colores, asociados a valores de resistividad. Si las mediciones se realizan a diferentes intervalos de tiempo, se puede ver el comportamiento de la resistividad y asociarlo a la movilidad del fluido. Es un buen estimador para definir la conductividad hidráulica, Su única limitante es la profundidad de investigación, no más de 100 m, los cuales son suficientes para conocer el comportamiento de la zona drenada del AVQ.



**Figura 4.18.** Aplicación del método eléctrico para conocer las características de la zona drenada.

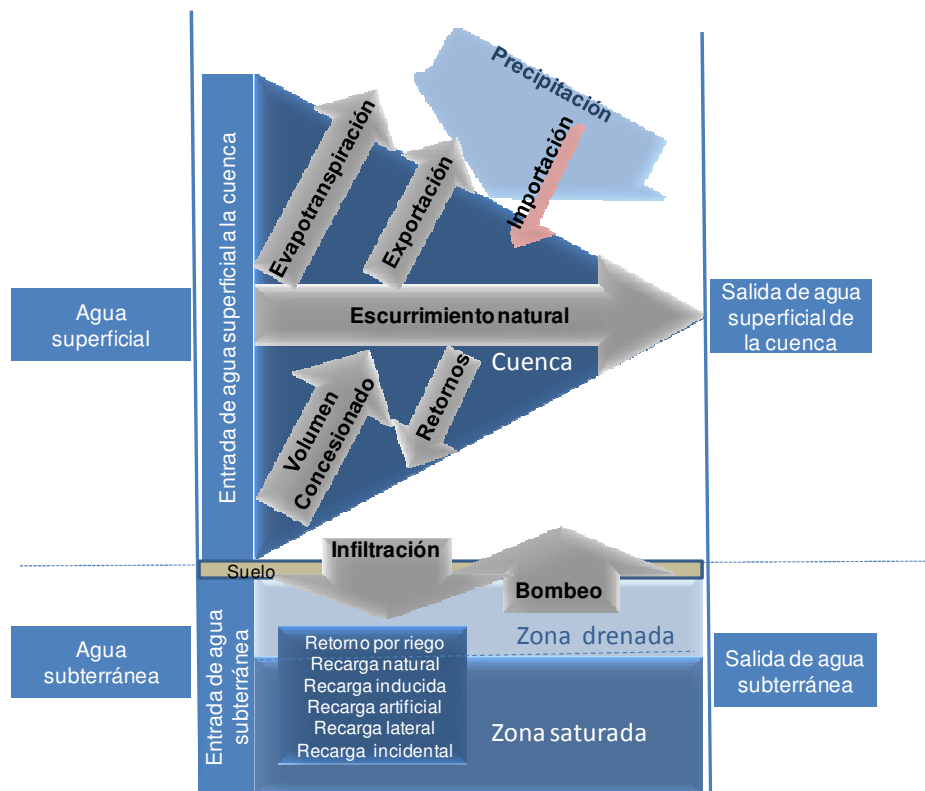
Es preciso tener en mente que en el AVQ su zona drenada es de más de 100 m, integrada principalmente por material vulcanosedimentario y coladas de basalto e



ignimbrita. De acuerdo a la información de los estudios realizados la unidad hidrogeológica tiene un valor de transmisividad de  $2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  y conductividades hidráulicas de 0.32 a 1.0 m por día. Esto indica que una gota que se introduzca al acuífero a partir de la zona libre de evapotranspiración tardará en llegar al acuífero entre 80 y 250 días, lo cual no se refleja en el comportamiento del nivel estático con una recuperación.

#### 4.7. Proceso de infiltración del agua para el acuífero del valle de Querétaro

El balance integral de las aguas superficiales y subterráneas involucra los conceptos que se muestran en la **Figura 4.19**. Se propone tomando en consideración la NOM-011-CONAGUA-2000.



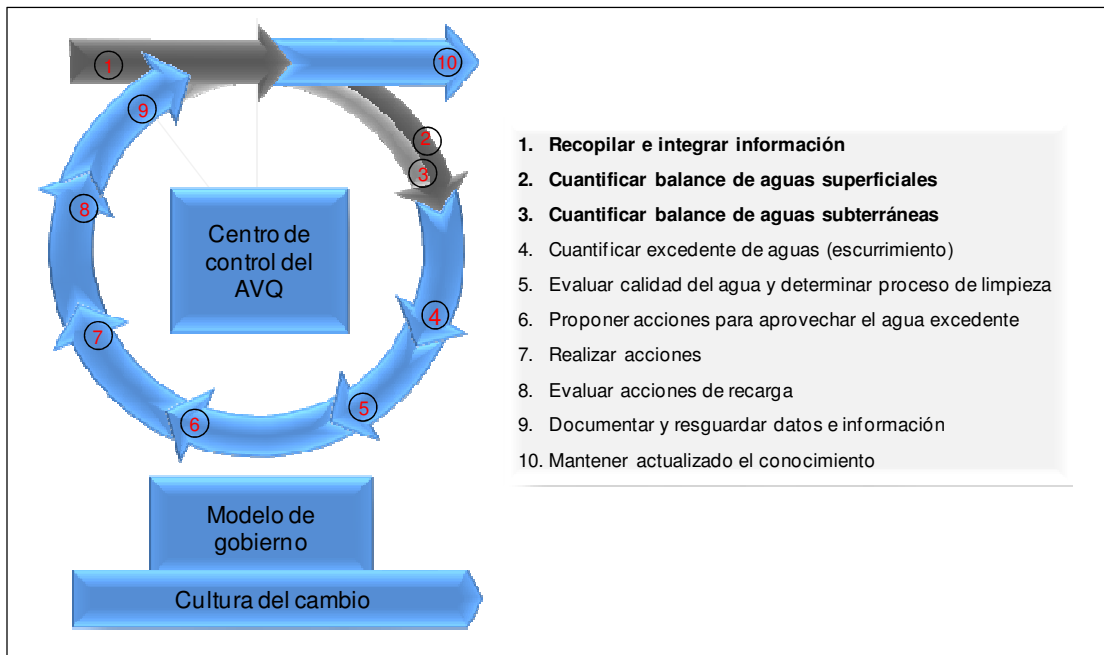
**Figura 4.19. Modelo del balance integral de aguas para el AVQ**

Si bien la normatividad indica algunos procedimientos para el cálculo individual de los balances superficiales y subterráneos para llegar al cálculo de la disponibilidad, en este trabajo se orientará a definir el proceso para infiltrar el agua y los mecanismos que deben realizarse para llevarlo a efecto.

Para este trabajo se entenderá por proceso al conjunto de actividades o tareas, mutuamente relacionadas entre sí, que admite elementos de entrada durante su desarrollo ya sea al inicio o a lo largo del mismo, los cuales se administran, regulan o auto

regulan bajo modelos de gestión particulares para obtener elementos de salida o resultados esperados.

Dentro del proceso, hay un tratamiento de entradas de diversos tipos en cada actividad o tarea agregándoles valor, de tal manera que se cumplan los requerimientos o necesidades que se proponen. En la **Figura 4.20** se plantea la propuesta del modelo de proceso para incrementar la infiltración en el AVQ, donde se presentan diez subprocesos los cuales deben ser administrados por una instancia (COTAS, organismo operador de agua u otro) por definir en el modelo de gobierno y además, estar respaldada con una cultura de cambio orientada en valores de sustentabilidad, compromiso, aprovechamiento del agua, monitoreo, participación y ecología.



**Figura 4.20. Propuesta de modelo del proceso para la infiltración de agua en el AVQ**

En la **Tabla 4.2** se describen los objetivos y la visión actual que se tiene sobre cada uno de los subprocesos propuestos.

**Tabla 4.2. Propuesta de proceso con objetivos y situación actual**

Proceso / subprocesso	Objetivo	Situación actual
<b>Infiltración de agua en el AVQ</b>	Aprovechar el agua excedente de la precipitación que transita en la cuenca del AVQ, así como el agua residual proveniente del acuífero que ha sido utilizada con fines público-urbano e industrial, para reincorporarla al subsuelo, a través de diferentes mecanismos, con el propósito de mantener o aminorar la explotación intensiva del acuífero y sustentar el desarrollo socioeconómico al acuífero.	A pesar de la normatividad no se tiene un conocimiento integral de la situación que guarda el AVQ ni existen acciones para sustentar la actividad socioeconómica que se realizan en él.
1. Recopilar e integrar información.	Conocer la situación actual que guarda el agua con base en la información disponible que sea de apoyo para proponer las acciones de mejora o correctivas que permitan la sustentabilidad del acuífero.	Mucha información dispersa.
2. Cuantificar balance de aguas superficiales.	Conocer la magnitud de la disponibilidad de agua superficial.	Se tiene un valor de la disponibilidad, sin embargo, los valores no son confiables por la falta de información actualizada.
3. Cuantificar balance de aguas subterráneas.	Conocer la disponibilidad de agua subterránea.	Se tiene un valor de la disponibilidad, sin embargo, los valores no son confiables por la falta de información actualizada.
4. Cuantificar el excedente de aguas (escurrimiento).	Conocer el volumen de agua de escurrimiento que se puede aprovechar en el AVQ.	Se cuenta con valores estimados.
5. Evaluar calidad del agua y determinar proceso de limpieza.	Conocer la calidad de aguas que se van a aprovechar para definir el tipo de tratamiento que se les puede aplicar.	Se cuenta con pocos valores e información dispersa.
6. Proponer acciones para aprovechar el agua de escurrimiento excedente.	Definir actividades técnicas, legales, sociales y obras de construcción.	Existen propuestas aisladas que en lugar de beneficiar perjudican al acuífero (recarga de acuíferos sin un sustento técnico del conocimiento integral de la situación).
7. Realizar acciones.	Construir obras de ingeniería y desarrollar una cultura de cambio para aprovechar el agua.	Existen obras aisladas, plantas de tratamiento que vuelven a verter el agua a los cuerpos de agua superficial. Hay muy pocas obras para captar el agua superficial en las cuales la mayoría no cumple con la NOM-015-CONAGUA-2007. <b>No hay cultura para el aprovechamiento del agua residual.</b>
8. Cuantificar volumen de recarga.	Evaluar las acciones desarrolladas y proponer acciones de mejora al proceso.	El único valor "confiable" es la cuantificación de la recarga con base en el balance de aguas subterráneas, sin embargo, no está actualizado.
9. Documentar y resguardar datos e información.	Administrar el conocimiento del AVQ.	Se tiene información en computadoras personales y en la cabeza de los técnicos, no está disponible.
10. Mantener actualizado el conocimiento.	Sustentar las actividades socioeconómicas del AVQ.	Si no se toman medidas inmediatas la sustentabilidad del acuífero está en riesgo.
11. Desarrollar un modelo tridimensional	Tener una visión clara de la situación actual del acuífero. Plantear diferentes escenarios y predecir cuál será su comportamiento.	No se cuenta con un modelo bien desarrollado, para la gestión del acuífero.