

## HIDROGEOLOGÍA

### CAPÍTULO I

#### PROPIEDADES HIDRODINÁMICAS DE LOS MEDIOS POROSOS

##### 1. INTRODUCCIÓN

Todas las aguas superficiales emergentes (ríos, quebradas, arroyos, lagunas, lagos, manantiales, humedales y otros) provienen de los acuíferos, esto es de las aguas subterráneas; las que su vez, provienen de la infiltración y percolación de las aguas pluviales. Para niveles freáticos profundos, el recorrido de las aguas, desde la infiltración hasta llegar al acuífero, se realiza en un estado de humedad de suelo momentáneamente saturado mientras dura la precipitación y un poco más allá. Al cortarse la precipitación, todo el perfil litológico del suelo, por encima de la napa freática, se libera del agua gravitacional, quedando sólo el agua retenida en los poros capilares, conformando el agua de retención del suelo. La máxima cantidad de agua que retiene el suelo, inmediatamente luego de haberse liberado del agua gravitacional se conoce con el nombre de *capacidad de campo*.

El agua que llega al acuífero, proveniente de la infiltración, se llama *agua de recarga* y su tiempo de viaje depende de la profundidad del acuífero y de la naturaleza y estructura de los estratos ubicados por encima del nivel freático. El *nivel freático* no es más que la superficie de separación entre un estado de suelo saturado, ubicado por debajo, y un medio no saturado por encima.

En consecuencia, la dinámica del agua en el subsuelo se realiza en dos medios distintos: poroso saturado y poroso no saturado.

##### 1.1. Definición de Hidrogeología

La hidrogeología es una ciencia, relativamente moderna, que estudia la disponibilidad y explotación racional y planificada de las aguas subterráneas.

##### 1.2. Problemática del recurso hídrico

La explosión demográfica mundial incontenible determina que el crecimiento poblacional sea muy vertiginoso, donde las necesidades y demandas que hay que satisfacer se traducen en un aumento de la producción, en suma, un crecimiento económico. Pues, todo incremento en la producción se traduce directa o indirectamente en una mayor demanda de agua con fines diversos.

En estos momentos los países del orbe se ponen de acuerdo para buscar un desarrollo sustentable, basado en un crecimiento económico, mejoramiento de la calidad de vida, pero con protección del ambiente, por lo que se pone en evidencia la obligación que tienen las generaciones presentes para que la satisfacción de sus necesidades y demandas no comprometan las propias de las generaciones futuras. Todo lo cual requiera de una explotación racional y planificada de los recursos naturales y, entre éstos, el agua.

El agua es el recurso natural más importante de la tierra y constituye un requisito indispensable para la vida, en todos sus aspectos. Sin embargo, la disponibilidad y calidad del agua van disminuyendo en forma sorprendente, con daños irreversibles para la ecología. El agua es un recurso muy sensible a la contaminación generalizada, puesto que la mayor parte del agua utilizada no se consume, sino que regresa a una corriente superficial o subterránea para su reutilización.

### 1.3. Extracción de las Aguas Subterráneas

En el pasado sólo se ha recurrido a la explotación de las aguas subterráneas cuando éstas constituían las únicas fuentes para abastecimiento, tal es el caso de Israel. En este momento se torna casi indispensable su utilización, puesto que la cantidad y calidad de las aguas superficiales, en general, es muy deficiente.

En general, puede decirse que el recurso hídrico superficial va siendo cada vez más escaso, debido al incremento incesante de las necesidades y demandas para los diversos usos. De otro lado, las fuentes de agua superficial más inmediatas y fáciles de incorporar al abastecimiento ya están siendo explotadas, quedando las fuentes más difíciles de aprovechar, cuyos proyectos de explotación demandan fuertes inversiones y son prácticamente infactibles económicamente para los países más pobres.

Frente a toda esta problemática de disponibilidad de agua superficial surge como alternativa de solución el aprovechamiento racional y planificado de las aguas subterráneas.

Las ventajas más importantes que ofrece la explotación de las aguas subterráneas son:

- a) A diferencia de las aguas superficiales, las aguas subterráneas se encuentran en cualquier lugar de la tierra.
- b) Los proyectos de aprovechamiento de las aguas subterráneas no requieren mayormente de obras hidráulicas complementarias importantes (obras de arte), como sí lo requieren los de aguas superficiales.
- c) Las fluctuaciones o variabilidad de los flujos subterráneos son pequeños (disponibilidad sostenida), en comparación con la variabilidad de los flujos superficiales que son extremadamente de régimen muy irregular.
- d) El costo de inversión inicial de los proyectos de abastecimiento, a base de aguas subterráneas, es relativamente bajo; comparado con los costos de operación que son sumamente altos. Caso contrario ocurre con los proyectos de aprovechamiento de aguas superficiales. Esto debido a que la energía siempre es cara.
- e) Desde el punto de vista bacteriológico, las aguas subterráneas son de mejor calidad que las superficiales, debido a que estas últimas están más expuestas a la contaminación y los costos de tratamiento son sumamente altos.

La ausencia y/o escasez de las aguas superficiales constituye hoy en día un imperativo para aprovechar las aguas subterráneas y dado que generalmente ello representa altos costos, es un reto para la ingeniería hidráulica manejar todas las variables que conlleven a una explotación racional, planificada y óptima del recurso hídrico.

#### 1.4. Aspectos Hidrológicos del Agua Subterránea

El agua subterránea es parte del ciclo hidrológico y por tanto dependiente de la hidrología superficial. Las características más saltantes del flujo de agua subterránea son:

1. La disponibilidad del agua subterránea es de carácter sostenido, a diferencia de lo que ocurre con las aguas superficiales, en las cuales la componente de escorrentía directa origina grandes fluctuaciones de los flujos.
2. La predicción de la disponibilidad de las aguas subterráneas requiere de registros históricos cortos, debido a que el flujo es lento, el acuífero grande y las variaciones pequeñas.

#### 1.5. Definición de acuífero

El acuífero es una formación rocosa que se caracteriza por almacenar y conducir el agua subterránea.

##### 1.5.1. Tipos de Acuíferos

Conforme a su comportamiento hidráulico se puede distinguir los siguientes tipos de acuíferos (Kruseman, G.P. y N.A.W. de Ridder 1970).

##### a) Acuífero Confinado

Este acuífero está limitado por dos capas o estratos impermeables confinantes, un techo superior y otra capa inferior donde el agua se mantiene bajo presión. Las capas limitantes tienen una conductividad hidráulica nula. Desde un pozo perforado en un acuífero confinado puede o no salir agua saltante o brotante, según que la *superficie piezométrica* se ubique por encima o por debajo de la cota de la superficie del terreno, respectivamente.

Los términos acuífero confinado y acuífero artesiano son sinónimos para fines prácticos, aunque el término *pozo artesiano* se utilice más comúnmente para un pozo con agua saltante o brotante. Se dice que es brotante o saltante porque el agua puede emerger por sí sola a la superficie de la tierra sin la utilización de ninguna fuente de energía externa.

Los puntos hasta donde podría llegar el agua en pozos construidos en un acuífero confinado forma una superficie ficticia llamada "*Superficie piezométrica*".

Aún cuando se esté extrayendo agua desde un acuífero confinado, éste queda totalmente saturado en todo su espesor, sólo y sólo si, la superficie piezométrica se mantiene por encima del techo confinante.

El acuífero confinado se caracteriza también por las características de liberar el agua: por la expansión o dilatación de agua y compactación de la matriz sólida o esqueleto granular. El techo confinante superior tiene un peso aparente que está balanceado por la matriz sólida (presión ínter granular) y por la presión del agua (presión intersticial).

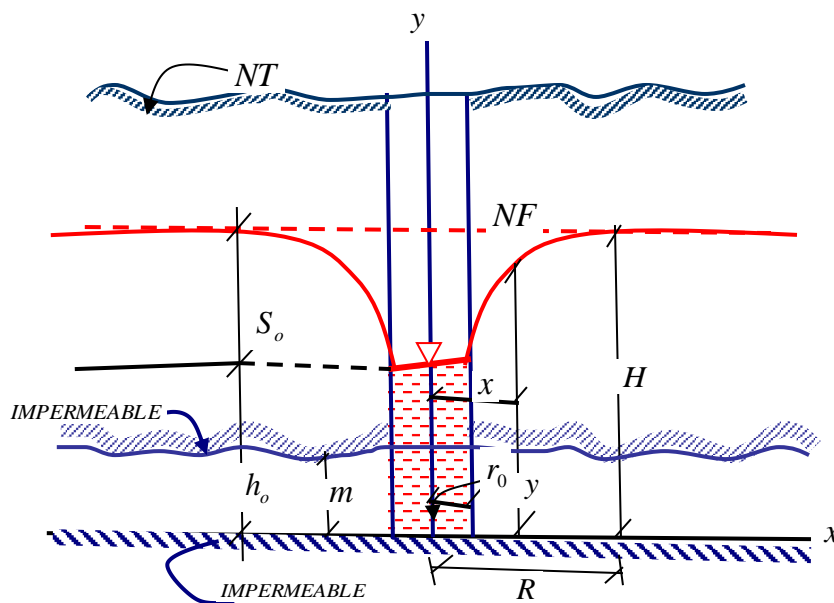


Fig. 1.- Acuífero confinado

### b) Acuífero Semi-confinado

Se dice que un acuífero es semi-confinado cuando el techo confinante de un acuífero confinado es semi-permeable, o sea, que tiene una conductividad hidráulica muy pero muy inferior a la del acuífero. En tal caso, en el estudio del movimiento del agua en la capa semi-confinante, se considera despreciable el movimiento horizontal, involucrando sólo el movimiento vertical o filtración.

El acuífero semi-confinado es un acuífero confinado que recibe agua del techo confinante, cuando la superficie freática o piezométrica del acuífero ubicado por encima del techo confinante está por encima de la superficie piezométrica del acuífero semi-confinado. Caso contrario, el movimiento del agua es desde el acuífero semi-confinado hacia arriba.

Para detectar el movimiento vertical es necesario instalar piezómetros tanto en el acuífero como en la capa semipermeable superior e inferior. En general, el comportamiento hidráulico del acuífero semi-confinado es similar al del acuífero confinado.

**c) Acuífero semi-libre**

El acuífero semi-libre difiere del acuífero semi-confinado en que no presenta techo semiconfinante y por tanto la conductividad hidráulica de la capa superior es del mismo orden de magnitud. Este hecho admite una única superficie libre sometida a la presión atmosférica, comportándose como único acuífero, aunque la capa superior libera el agua con algún grado de dificultad debido a la baja conductividad hidráulica. La extracción de agua de este acuífero provoca el desagüe parcial del acuífero, de modo que éste no queda saturado en todo su espesor original. El efecto de un rendimiento retardado se pone también de manifiesto en acuíferos semilibres con un contenido relativamente grande material fino.

Ciertos autores demostraron que este tipo de acuífero es un caso particular de acuíferos intermedios entre el tipo semi-confinado y el libre es por ello que se denomina semi-libre.

**d) Acuífero libre**

Un acuífero libre se caracteriza por la presencia de superficie libre y por el hecho de que la presión del agua en cualquier punto de la parte saturada del acuífero sigue la ley hidrostática. Al extraer agua del acuífero libre hace variar su espesor saturado empezando por la zona de desagüe. Se diferencia un acuífero libre de uno semi-libre en que el primero está formado de una sola capa que comúnmente se supone que la liberación del agua es instantánea y por efecto gravitacional.

En general, se dice que un acuífero es libre cuando la relación entre la conductividad hidráulica del acuífero a la de la capa superior cumple la relación (1); caso contrario es semi-libre.

$$\frac{K_1}{K_2} \geq 10 \quad (1)$$

Donde:

$K_1$  = Conductividad hidráulica del acuífero

$K_2$  = Conductividad hidráulica de la capa superior



$\rho$	=	densidad o masa específica ( $FT^2L^{-4}$ )
$g$	=	aceleración de la gravedad ( $LT^{-2}$ )
$\alpha$	=	compresibilidad vertical de la matriz sólida del acuífero ( $L^2F^{-1}$ )
$n$	=	porosidad del acuífero (%)
$\beta$	=	compresibilidad del agua ( $F^{-1}L^2$ )

El término  $(\rho g \alpha)$  es la cantidad de agua liberada por compactación de la matriz sólida del acuífero, mientras que  $(n \beta \rho g)$  es la cantidad de agua liberada por dilatación o expansión del agua en el acuífero.

El almacenamiento específico tiene dimensión  $L^{-1}$  y se expresa comúnmente en el sistema métrico por  $m^{-1}$ .

### 1.6.3. Coeficiente de almacenamiento (S) de acuíferos deformables

El coeficiente de almacenamiento de un acuífero compresible se define como el volumen de agua que una columna de acuífero, que tiene como base la unidad de área y como altura el espesor medio del acuífero, libera por expansión del agua y compactación de la matriz sólida, cuando la carga hidráulica disminuye en una unidad. El coeficiente de almacenamiento “S” se relaciona con el almacenamiento específico,  $(S_s)$  mediante la expresión (3).

$$S = m S_s \quad (3)$$

Donde, “m” viene a ser el espesor medio del acuífero.

El coeficiente de almacenamiento para acuíferos compresibles está referido únicamente a las partes confinadas del acuífero, es adimensional y, para acuíferos naturales, toma valores entre  $10^{-6}$  y  $10^{-4}$ .

Los acuíferos confinados y semi-confinados liberan agua sólo por expansión del agua y compactación de la matriz sólida del acuífero, mientras que los acuíferos libres y semi-libres además liberan agua por drenaje gravitacional.

### 1.6.4. Rendimiento específico de acuíferos no deformables ( $S_y$ )

El rendimiento específico de un acuífero es la razón entre el volumen de agua liberado al volumen de acuífero que lo libera por drenaje gravitacional. También se le define como la porosidad drenable del acuífero.  $S_y$  es adimensional, para arenas el rendimiento específico es del orden de 0.1 a 0.2

$$S_y = \frac{\text{Volumen liberado de agua}}{\text{Volumen total acuífero}} \quad (4)$$

### 1.6.5. Permeabilidad o permeabilidad intrínseca (k)

La permeabilidad o permeabilidad intrínseca de un medio poroso es la propiedad que mide la facilidad de dejarse atravesar o ocupar por los fluidos líquidos. Depende únicamente de las propiedades de la matriz sólida del medio poroso. Tiene por

dimensiones  $L^2$  y es expresada en  $cm^2$  o en  $m^2$  en el sistema métrico. Otra unidad de la permeabilidad intrínseca es el Darcy que equivale a  $9.869 \cdot 10^9 cm^2$ . Se relaciona con la porosidad total que incluye a los vacíos capilares y gravitacionales.

### 1.6.6. Conductividad hidráulica (K)

Es la propiedad que mide la facilidad con la que un líquido específico puede moverse a través de un acuífero. Depende, tanto de las propiedades del fluido, como de las de la matriz sólida y, para un mismo líquido, tiene relación directa con el porcentaje de vacíos gravitacionales del medio poroso.

En el aprovechamiento de agua subterránea, se define como el flujo de agua a través de un área unitaria perpendicular a la dirección del flujo, bajo el gradiente hidráulico del 100% y a la temperatura de 20 °C. La conductividad hidráulica tiene dimensiones  $L/T^{-1}$  y se suele expresar en el sistema métrico en  $cm/s$ ,  $m/s$  o en  $m/día$ ; a veces, en  $m^3/día \cdot m^2$ .

La conductividad hidráulica se relaciona con la permeabilidad intrínseca mediante la expresión (5).

$$K = k \frac{\delta}{\mu} \quad (5)$$

Donde:

K= conductividad hidráulica

k = Permeabilidad intrínseca

$\delta$  = Peso específico del fluido

$\mu$  = Viscosidad dinámica del fluido.

### 1.6.7. Trasmisividad (T)

La Trasmisividad es definida en relación con los flujos bidimensional y unidimensional en un acuífero. Se define como el flujo de agua a través de un área perpendicular a la dirección del flujo, de un metro de ancho y se extiende sobre todo el espesor saturado del acuífero, bajo el gradiente hidráulico de 100 % y a la temperatura de 20 °C. La trasmisividad tiene por dimensiones  $L^2T^{-1}$  y, en el sistema métrico, comúnmente se expresa en  $m^2/día$  o  $m^3/día \cdot m$ . Los valores de trasmisividad encontrados en la práctica van desde un poco menos de 12.4  $m^2/día$  hasta algo más de 124.0  $m^2/día$ . Los acuíferos con valores de Trasmisividad menores que 12.4  $m^2/día$  sirven para uso doméstico, mientras que los acuíferos con Trasmisividad superiores a 124.0  $m^2/d$  son valiosos para riego y el abastecimiento municipal e industrial (Mogg, L.L, 1967).

La Trasmisividad, de acuerdo a su definición, se expresa mediante la ecuación (6).

$$T = K b = K m \quad (6)$$

Donde:

K = conductividad hidráulica

m = espesor medio del acuífero

b = espesor local del acuífero



### 1.6.8. Resistencia hidráulica en acuíferos semiconfinados (C)

La resistencia hidráulica, llamada también resistencia al flujo vertical, es una propiedad de los *acuíferos semi-confinados* y, viene a ser la relación entre el espesor de la capa semipermeable y la conductividad hidráulica “K” de dicha capa. Se define según la relación (7).

$$C = \frac{m^1}{K^1} = \frac{\text{Espesor capa semi - permeable}}{\text{Conductividad Hidráulica}} \quad (7)$$

Donde:

C = Resistencia hidráulica

$m^1$  = Espesor del techo semipermeable

$K^1$  = Conductividad hidráulica de la capa semipermeable.

La resistencia hidráulica tiene por dimensiones, tiempo T.

Cuando el valor de la resistencia hidráulica “C” tiende al infinito, el acuífero será confinado; esto es equivalente a que la conductividad hidráulica del techo confinante es nula.

### 1.6.9. Factor de filtración en acuíferos semiconfinados (F<sub>f</sub>)

El factor de filtración, denominado también factor de fuga, determina la distribución de la filtración en un *acuífero semi-confinado*, es decir, determina el origen del agua que se extrae desde un pozo perforado en dicho acuífero. Valores altos de “F<sub>f</sub>”, indican gran resistencia al flujo en la capa semi-permeable, comparado con la resistencia al flujo en el acuífero. En tal caso, la influencia de la filtración será pequeña. El factor de filtración tiene dimensiones de longitud L y se expresa en el sistema MKS en metros.

La estimación del factor de filtración viene dado por la expresión (8).

$$F_f = \sqrt{K^1 m^1 C} = \sqrt{T^1 C} \quad (8)$$

Donde:

F<sub>f</sub> = Factor de filtración.

$K^1$  = Conductividad hidráulica del techo semiconfinante.

$T^1$  = Transmisividad del techo semiconfinante.

$m^1$  = Espesor medio de la capa semiconfinante.

C = Resistencia hidráulica de la capa semipermeable

## 1.7. Isotropía

Se dice que un acuífero es isótropo o isotrópico, con respecto a la conductividad hidráulica, si en un mismo punto, ésta es independiente de las direcciones. Esto equivale a decir que la conductividad hidráulica, en un mismo punto, tiene el mismo valor en todas las direcciones, variando de un punto a otro. Teóricamente, ello implica que las partículas tienen el mismo grado de acomodamiento en todas las direcciones en todo el campo acuífero.

En consecuencia, se dice que el acuífero es isotrópico si se cumplen las condiciones dadas por las relaciones (9).

$$\text{Pto. (1): } K_{x_1} = K_{y_1} = K_{z_1} \quad (9.a)$$

$$\text{Pto (2): } K_{x_2} = K_{y_2} = K_{z_2} \quad (9.b)$$

$$\text{Pto. (3): } K_{x_3} = K_{y_3} = K_{z_3} \quad (9.c)$$

Pudiendo denotarse esto para los n puntos del medio poroso.

Matemáticamente, la isotropía de un suelo puede generalizarse cuando, en un mismo punto, se verifica la siguiente condición:

$$\frac{\partial K}{\partial x} = \frac{\partial K}{\partial y} = \frac{\partial K}{\partial z} = 0 \Rightarrow K = \text{constante} \quad (9.d)$$

Pudiendo variar de un punto a otro; esto es  $\frac{\partial K}{\partial s} \neq 0$ , siendo “s” cualquier desplazamiento.

### 1.8. Anisotropía

Un acuífero es anisótropo cuando, en un mismo punto del acuífero, la conductividad hidráulica varía en todas las direcciones. Esto se representa matemáticamente mediante las relaciones (10).

$$\text{Pto. (1): } K_{x_1} \neq K_{y_1} \neq K_{z_1} \quad (10.a)$$

$$\text{Pto. (2): } K_{x_2} \neq K_{y_2} \neq K_{z_2} \quad (10.b)$$

$$\text{Pto. (3): } K_{x_3} \neq K_{y_3} \neq K_{z_3} \quad (10.c)$$

Pudiendo escribir lo mismo para los n puntos del medio poroso.

Matemáticamente, la anisotropía de un suelo puede generalizarse cuando, en un mismo punto, se cumple la siguiente condición:

$$\frac{\partial K}{\partial x} \neq \frac{\partial K}{\partial y} \neq \frac{\partial K}{\partial z} \neq 0 \quad (10.d)$$

Los acuíferos que se encuentran en la naturaleza son comúnmente anisotrópicos. Por ejemplo, los acuíferos aluviales y las formaciones geológicas estratificadas son obviamente más permeables en las direcciones horizontales que en las verticales. También puede existir anisotropismo en el plano horizontal.

### 1.9. Homogeneidad

Se dice que un acuífero es homogéneo, con respecto a la conductividad hidráulica, si en una misma dirección tiene el mismo valor en todos los puntos. Esto es que para 3 puntos del campo se pueden escribir las relaciones (11).

$$K_{x1} = K_{x2} = K_{x3} \quad (11.a)$$

$$K_{y1} = K_{y2} = K_{y3} \quad (11.b)$$

$$K_{z1} = K_{z2} = K_{z3} \quad (11.c)$$

Lo cual, generalizando, se expresa mediante las condiciones siguientes:

$$\frac{\partial K}{\partial x} = K_x = Cte.; \quad \frac{\partial K}{\partial y} = K_y = Cte.; \quad \frac{\partial K}{\partial z} = K_z = Cte. \quad (11.d)$$

Un acuífero es **isótropo homogéneo**, cuando se cumplen simultáneamente los conjuntos de ecuaciones correspondientes. Esto es cuando, en cualquier del acuífero, la conductividad hidráulica tiene el mismo valor en todas las direcciones.

$$K_{x1} = K_{x2} = K_{x3} = K_{y1} = K_{y2} = K_{y3} = K_{z1} = K_{z2} = K_{z3} = K \quad (12.a)$$

Generalizado, cuando en todos los puntos, se cumple la condición siguiente:

$$K_x = K_y = K_z = K = Cte. \quad (12.b)$$

Un acuífero es homogéneo anisótropo cuando se cumplen simultáneamente de homogeneidad y de anisotropía.

### 1.10. Heterogeneidad

Se dice que un acuífero es heterogéneo, con respecto a la conductividad hidráulica, cuando en una misma dirección, el valor de la conductividad hidráulica cambia de un punto a otro. Así, para 3 puntos del campo debe satisfacer la condición de las relaciones (13).

$$K_{x1} \neq K_{x2} \neq K_{x3} \quad (13.a)$$

$$K_{y1} \neq K_{y2} \neq K_{y3} \quad (13.b)$$

$$K_{z1} \neq K_{z2} \neq K_{z3} \quad (13.c)$$

El acuífero es **heterogéneo isótropico** si los valores de la conductividad hidráulica satisfacen simultáneamente las condiciones de heterogeneidad e isotropía. Un acuífero también puede ser **anisótropo heterogéneo**, si se satisfacen simultáneamente las condiciones de anisotropía y heterogeneidad.

Un acuífero real o cualquier otro suelo de la naturaleza son, en general, son campos anisótropos heterogéneos. El Modelamiento matemático de flujos en medios porosos, muchas veces tienen que aproximarse a modelos sencillos, tal como son los medios isótropos homogéneos.

El Modelamiento de cuencas en las zonas de suelo no saturado y en los acuíferos es bastante complicado, no sólo por la anisotropía y heterogeneidad de los diversos horizontes litológicos, sino también por cantidad de información que se requiere en muchos puntos del campo.