

3  
230



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
División de Ciencias de la Tierra  
Ingeniería Petrolera

MODELOS CONCEPTUALES DE  
FUNCIONAMIENTO DE LOS ACUIFEROS

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO PETROLERO  
P R E S E N T A N:  
CARLOS CORREA GUERRERO  
FERNANDO CANO MARTINEZ  
JORGE ALFREDO JUAREZ AVILA  
MIGUEL ANGEL MAQUEDA CEBALLOS



México, D. F.

1993

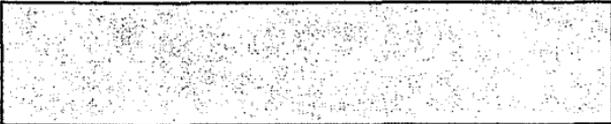
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## **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.



***CONTENIDO***

## MODELOS CONCEPTUALES DE FUNCIONAMIENTO DE LOS ACUIFEROS

### CONTENIDO

#### CAPITULO I "INTRODUCCION"

- I.1 ANTECEDENTES HISTORICOS DE MODELOS CONCEPTUALES DE FUNCIONAMIENTO DE ACUIFEROS.
- I.2 CONTENIDO.

#### CAPITULO II "CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS"

##### II.A CARACTERISTICAS FISICAS DE LAS FORMACIONES.

##### II.1 POROSIDAD.

- II.1.1 Porosidad absoluta.
- II.1.2 Porosidad efectiva.
- II.1.3 Porosidad primaria.
- II.1.4 Porosidad secundaria.

##### II.2 METODOS PARA DETERMINAR POROSIDAD EFICAZ SOBRE EL TERRENO.

- II.2.1 Método del caudal de flujo.
- II.2.2 Método de la velocidad real.
- II.2.3 Método de los ensayos de caudales en los sondeos.

##### II.3 COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO.

##### II.4 PERMEABILIDAD.

- II.4.1 Permeabilidad absoluta.
- II.4.2 Permeabilidad efectiva.
- II.4.3 Permeabilidad relativa.
- II.4.4 Permeabilidad vertical.
- II.4.5 Permeabilidad horizontal.
- II.4.6 Determinación en laboratorio.
- II.4.7 Determinación sobre el terreno.

##### II.5 TRANSMISIBILIDAD.

**II. B CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS DE AGUAS SUBTERRANEAS.**

**II.6 PROPIEDADES FISICAS GENERALES.**

II.6.1 *Masa volumétrica.*

II.6.2 *Peso específico.*

II.6.3 *Densidad.*

II.6.4 *Viscosidad.*

**II.7 TEMPERATURA.**

II.7.1 *Temperatura de suelo.*

II.7.2 *Medición de la temperatura de las aguas subterráneas.*

**II.8 CONDUCTIVIDAD Y RESISTIVIDAD ELECTRICAS.**

**II.9 PH.**

**II.10 HIDROQUIMICA.**

II.10.1 *Análisis químico de las aguas subterráneas.*

II.10.2 *Interpretación de resultados del análisis químico.*

**CAPITULO III "GEOMETRIA DEL SISTEMA"**

**III.1 INTRODUCCION.**

**III.2 GEOLOGIA.**

III.2.1 *Rocas no consolidadas.*

III.2.2 *Rocas plutónicas y Rocas metamórficas.*

III.2.3 *Rocas volcánicas.*

III.2.4 *Rocas sedimentarias consolidadas.*

**III.3 PROSPECCION GEOFISICA.**

III.3.1 *Métodos eléctricos.*

III.3.2 *Métodos de resistividad.*

III.3.3 *Métodos electromagnéticos.*

III.3.4 *Método magnetotélúrico.*

**III.4 FORMAS DEL SISTEMA.**

#### CAPITULO IV "CONCEPTUALIZACION"

- IV.1 COMO OBTENER UN ENTENDIMIENTO COMPLETO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA.
- IV.2 RELACION E INFLUENCIA QUE TIENE LA EVOLUCION GEOQUIMICA DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN LA CONCEPTUALIZACION.
- IV.3 RELACIONES GEOLOGIA-GEOMORFOLOGIA-COMPOSICION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS.
- IV.4 RESPUESTA A LOS ESTIMULOS QUE PRESENTA UN ACUIFERO EN UNA PRUEBA DE BOMBEO, EN LA RECARGA Y CON LA PRESENCIA DE BARRERAS IMPERMEABLES, ASI COMO LA RELACION QUE TIENE EN LA CONCEPTUALIZACION DEL FUNCIONAMIENTO DEL MISMO.

#### CAPITULO V "MODELOS CONCEPTUALES"

- V.1 INTRODUCCION.
- V.2 EL ACUIFERO COMO ELEMENTO DEL SISTEMA.
- V.3 MODELO DE UN ACUIFERO.
- V.4 CLASIFICACION DE MODELOS.
  - V.4.1 Modelos Analíticos.
  - V.4.2 Modelos Matemáticos.
  - V.4.3 Modelos Analógicos.
- V.5 SECUENCIA DE MODELACION.
- V.6 OBJETIVOS DE MODELOS DE ACUIFEROS.
- V.7 DATOS NECESARIOS, OBTENCION Y PRESENTACION.
- V.8 CUENCA HIDROLOGICA DE GUADALAJARA.
  - V.8.1 Ubicación.
  - V.8.2 Fisiografía.
  - V.8.3 Geología.
  - V.8.4 Tectónica.
  - V.8.5 Geohidrología.

"CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES"

"BIBLIOGRAFIA"

# ***CAPITULO I***

## ***INTRODUCCION***

## 1.1 ANTECEDENTES HISTORICOS DE MODELOS CONCEPTUALES DE FUNCIONAMIENTO DE ACUIFEROS.

Los modelos de aguas subterráneas son en general de muy reciente concepción, por lo que apenas puede hablarse de historia de los mismos. Los primeros modelos de simulación aparecieron alrededor de 1925 únicamente a nivel de laboratorio. A partir de 1950 y especialmente a partir de 1960, es cuando se empieza un acelerado desarrollo, basado principalmente en la utilización de los modernos componentes y aparatos electrónicos. La evolución es muy rápida y es difícil prever los logros futuros, pues en la actualidad ya se puede hacer uso de las computadoras como una herramienta muy poderosa en el manejo de gran cantidad de información, en la modelación de las técnicas hidroiológicas para obtener datos y concepciones sobre los sistemas acuíferos.

En el presente trabajo no se trata de modelar acuíferos basados en expresiones matemáticas, tomando una gran cantidad de datos como pudiera suponerse, sino de hacer una conceptualización de como se cree que está funcionando un acuífero, ya sea en una cuenca cerrada o una cuenca abierta, bajo ciertos argumentos.

Estos argumentos van desde el estudio de las características físicas propias del acuífero, geología, geometría, formas, tipos y características de las aguas que contiene, así como su comportamiento a ciertos estímulos, tales como la extracción o bien, en algunos casos como la inyección de agua.

## 1.2 CONTENIDO

En el capítulo dos se analizan las Características Físicoquímicas del sistema roca - fluidos como son :

- Porosidad ( $\phi$ )
- Coeficiente de almacenamiento (S)
- Permeabilidad o Conductividad hidráulica (k)
- Transmisibilidad (T)
- Masa Volumétrica ( $\rho$ )
- Peso Específico ( $\gamma$ )
- Densidad (d)
- Viscosidad ( $\nu$ )
- Temperatura
- Resistividad (R)
- Grado de Acidez (Ph)
- Hidroquímica

Con el objetivo de saber por primeros indicios si el sistema roca - fluidos tienen las características necesarias para ser un acuífero económicamente explotable.

En el capítulo tres se estudia la Geometría del sistema ; es decir, la forma y límites laterales, superiores, inferiores ( de la matriz y medio encajonante ); así como los métodos de prospección geofísica que ayudan a determinar dicha geometría, además de los diferentes tipos de rocas que pueden o no constituir un acuífero.

Una vez conocidas las características físicoquímicas y la geometría del sistema, se pueden relacionar; aspecto que se hace en el capítulo cuatro, Conceptualización, con el fin de poder establecer el Modelo Geohidrológico en una región determinada.

Por último, en el capítulo cinco se analizan los diferentes tipos de modelos (analíticos, matemáticos y analógicos); así como otros aspectos que son:

- Secuela de Modelación.
- Objetivos de la modelación de acuíferos.
- Datos necesarios, su obtención y presentación para con la modelación.
- Ejemplo: Cuenca Hidrológica de Guadalajara.

Un sistema de aguas subterráneas consiste en un medio geológico en el que ocurre el flujo de agua subterránea y en las interacciones de los desarrollos socioeconómicos y de las componentes hidrológica y climatológica sobre ese sistema físico.

Un modelo geohidrológico consiste en una representación idealizada de un sistema real de aguas subterráneas, o de una porción del mismo. La confiabilidad del modelo depende de la certidumbre con que se representa al sistema, por lo tanto, la solución o conclusión obtenida es válida para el sistema supuesto-real representado por el modelo. Las discrepancias entre las soluciones supuesto-real y real dependerán directamente de la certeza del modelo para describir al sistema original y a sus componentes.

# ***CAPITULO II***

***CARACTERISTICAS  
FISICOQUIMICAS***

## II. A. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS FORMACIONES

### II.1 POROSIDAD

Sea un volumen de roca,  $V_r$ , que está formado por cierto volumen de sólidos,  $V_s$ , y un volumen de huecos o poros,  $V_p$ ; es decir:

$$V_r = V_s + V_p$$

Si el volumen de poros se relaciona con el volumen de roca se obtiene la porosidad,  $\phi$ , donde ésta última puede expresarse en fracción o porcentaje.

$$\phi = \frac{V_p}{V_r} \quad \text{o bien} \quad \phi = \frac{V_p}{V_s + V_p}$$

No todos los poros de una roca están comunicados; he aquí, los diferentes tipos de porosidad.

#### II.1.1 Porosidad absoluta

Es la relación entre el volumen total de poros (comunicados y no comunicados) y el volumen de roca.

$$\phi = \frac{V_{pc} + V_{pnc}}{V_r}$$

#### II.1.2 Porosidad efectiva

Es la relación entre el volumen de poros comunicados y el volumen de roca.

$$\phi = \frac{V_{pc}}{V_r}$$

De acuerdo con lo anterior la porosidad absoluta puede

expresarse como:

$$\phi_a = \phi_o + \phi_{nc}$$

Donde  $\phi_{nc}$ , es la porosidad debida a los poros no comunicados o aislados.

La porosidad efectiva, es la porosidad que más interesa en explotación de acuíferos, dado que depende del volumen poroso comunicado, es decir; del espacio al que se le puede extraer fluido.

Desde el punto de vista geológico la porosidad de una roca se puede clasificar en primaria y secundaria.

#### II.1.3 Porosidad primaria

Es aquella que resulta de la acumulación de fragmentos o cristales para formar un sedimento, o sea lo que se forma durante el depósito.

A esta porosidad también se le denomina porosidad intergranular o intercristalina.

#### II.1.4 Porosidad secundaria

Es aquella que se genera posterior al depósito de los sedimentos y generalmente se presenta como fisuras, fracturas y cavernas.

Retomando a la porosidad efectiva, para su determinación se usa un método en laboratorio entre otros, y en éste, dicha porosidad varía en función del tiempo además de que si se trata de rocas coherentes, en las que no se tiene en cuenta el volumen de fisuras y cavidades, en la determinación sobre las muestras de pequeñas dimensiones; debido a estos dos aspectos, se está cometiendo error en el valor de la porosidad efectiva.

Por otra parte, la porosidad efectiva es función de la granulometría y sobre todo de la disposición de los granos (arreglo). Por lo cual su valor depende del grado de compactación de las rocas.

En la siguiente tabla se muestra la variación de la porosidad efectiva en relación con la compactación de los sedimentos deleznales.

| Materiales              | Grado de compactación |        |
|-------------------------|-----------------------|--------|
|                         | Muy laxa              | Fuerte |
| arena de grano grueso   | 0.33                  | 0.25   |
| arena de grano medio    | 0.25                  | 0.20   |
| arena de grano fino     | 0.20                  | 0.15   |
| arena de grano muy fino | 0.15                  | 0.10   |

De la tabla anterior, la porosidad efectiva disminuye con la compactación de las rocas deleznales. Por otra parte, es muy difícil tomar una muestra sobre el terreno sin modificar la disposición de los granos.

Resumiendo, los valores de porosidad efectiva determinados en laboratorio no son aplicables directamente sobre el terreno y explican en parte las divergencias, constatadas por diferentes autores, en la evaluación de la porosidad efectiva.

## II.2 METODOS PARA DETERMINAR LA POROSIDAD EFECTIVA SOBRE EL TERRENO.

### II.2.1 Método del caudal de flujo

### II.2.2 Método de la velocidad real

### II.2.3 Método de los ensayos de caudales en los sondeos

#### Método del caudal de flujo

La porosidad efectiva se puede calcular con buena precisión si se conoce el caudal de flujo de las reservas reguladoras

correspondientes a un descenso medio de la superficie piezométrica del manto acuífero considerado.

$$\phi_e = \frac{Q}{A \Delta H}$$

Donde :

Q, Volumen de agua fluida en las surgencias en m<sup>3</sup>.

A, Superficie media de la superficie piezométrica en m<sup>2</sup>.

ΔH, Descenso medio de la superficie piezométrica, determinado durante el mismo periodo que la medida del caudal, en m.

Otra forma de representar a la porosidad efectiva es:

$$\phi_e = \frac{Q}{V}$$

V, Volumen de la sección de la capa acuífera delimitada por dos posiciones extremas de la superficie piezométrica, en m<sup>3</sup>.

Método de la velocidad de flujo

Las condiciones para aplicar este método son conocer la velocidad de flujo, la permeabilidad y el gradiente hidráulico.

Aplicando la ley de Darcy

$$V_e = \frac{k \cdot i}{\phi_e}$$

$$\phi_e V_e = k \cdot i$$

$$\phi_e = \frac{k \cdot i}{V_e}$$

Donde:

φ<sub>e</sub>, porosidad efectiva

k, permeabilidad horizontal en m/s

$i$ , gradiente hidráulico  
 $V_e$ , velocidad real en m/s

$$Q = A V$$
$$V = V_e \phi_e$$

Donde:

$Q$ , es el caudal de flujo en  $m^3/s$   
 $A$ , superficie de la sección total de flujo en  $m^2$   
 $V$ , velocidad media ( $V = k i$ ), en m/s

### II.3 COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

Coefficiente de almacenamiento,  $S$ . Es el volumen de agua liberada por un prisma vertical de la capa acuifera, de sección igual a la unidad, para un descenso unitario del nivel piezométrico o de carga. Se expresa en porcentaje.

Depende de las características físicas de la roca almacén, y particularmente de la porosidad total.

El coeficiente de almacenamiento para un acuífero libre es igual a la porosidad efectiva (asegurándose que el drené por gravedad es completo).

### II.4 PERMEABILIDAD

#### II.4.1 Permeabilidad absoluta ( $k$ )

Propiedad que tiene la roca de permitir el paso de un fluido a través de ella, cuando se encuentra saturada al 100% del fluido.

#### II.4.2 Permeabilidad efectiva ( $k_e$ )

Se define como permeabilidad efectiva a un fluido particular, la permeabilidad del medio a ese fluido cuando su saturación es menor de 100%.

#### II.4.3 Permeabilidad relativa ( $k_r$ )

Se define como la relación entre la  $k_a$  y  $k$ .

Desde el punto de vista hidrológico la que tiene mayor interés es la permeabilidad absoluta.

Coficiente de permeabilidad de Darcy,  $k$ , es el volumen de agua libre que percola durante la unidad de tiempo a través de la unidad de superficie de una sección de capa acuífera bajo un gradiente hidráulico igual a la unidad, a la temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$ .

Teniendo las dimensiones de una velocidad y siendo las unidades recomendadas  $\text{m}$ ,  $\text{m}^2$ ,  $\text{m}^3$  y segundos, por lo cual se expresa en metros por segundo.

Considerando condiciones hidrológicas naturales existen dos tipos de permeabilidad.

#### II.4.4 Permeabilidad vertical

Considerada en la infiltración, caracteriza el flujo de aguas subterráneas de arriba a abajo.

#### II.4.5 Permeabilidad horizontal

Rige el flujo horizontal de las aguas subterráneas.

La permeabilidad vertical y la permeabilidad horizontal son diferentes, porque no son isótropos los materiales, esto tiene importancia en el estudio de la recarga en acuíferos.

Las lutitas y ciertas clases de arena tienen altas porosidades, sin embargo, sus granos son tan pequeños que los caminos que permiten el paso de líquidos son escasos y tortuosos. Por lo tanto, sus permeabilidades pueden ser muy bajas.

En cambio otras formaciones como la caliza, pueden presentar pequeñas fracturas o fisuras de una gran extensión.

La porosidad de dicha formación será baja, pero la

permeabilidad de una fractura puede ser muy grande. Como resultado, las calizas fracturadas pueden tener bajas porosidades pero altas permeabilidades. Algunos autores consideran dos tipos de permeabilidad, la intrínseca y la adquirida. La primera es la permeabilidad original o granulométrica, cuando la roca no ha sufrido efectos de tipo tectónico. La segunda se debe a las fracturas y fisuras que las rocas carbonatadas e ígneas sobre todo adquieren, tiempo después de su formación.

#### II.4.6 Determinación en el laboratorio

La permeabilidad al igual que la porosidad se puede determinar mediante estudios sobre muestras en el laboratorio, o por ensayos en el campo. También aquí los métodos de campo son los que aportan resultados más confiables, o al menos se adaptan mejor a las condiciones naturales.

En el laboratorio se puede determinar la permeabilidad mediante:

a) Análisis granulométricos cuyos parámetros permiten la utilización de fórmulas empíricas.

b) Permeámetros, utilizando como fluido agua o un gas. Para ambos se pueden tener dos tipos: De carga constante y de carga variable.

#### II.4.7 Determinación sobre el terreno

Se dará preferencia a los métodos de determinación sobre el terreno que obtengan los resultados más similares a los hechos. Es decir el material acuífero natural raramente es homogéneo e isotrópico y la toma de muestras sólo da valores puntuales no representativos de los valores medios de las características hidrogeológicas de las capas acuíferas.

Los métodos para este caso se pueden clasificar en cuatro tipos:

1. Ensayos de caudal por bombeo.
2. Ensayos puntuales.
3. Ensayos por pruebas en los ensayos.
4. Determinación de la velocidad real.

Estas características físicas de las rocas, porosidad y permeabilidad se pueden clasificar en forma directa o indirecta; mediante los estudios antes mencionados.

Conociendo ambas propiedades en una formación acuifera y correlacionando valores en ciertos puntos y zonas, se puede tener una premisa sobre las características del sistema y sobre todo tener una idea de como está configurado el acuífero y como se espera que sea su funcionamiento.

#### II.5 TRANSMISIBILIDAD

Transmisibilidad, (T), es el producto del coeficiente de permeabilidad de Darcy, k, por el potencial H de la capa acuifera libre o cautiva, en metros.

El coeficiente de transmisibilidad indica la capacidad del acuífero para transmitir agua de todo su espesor.

$$T = k H$$

Donde:

T, en  $m^2/s$

k, en  $m/s$

H, en m

Se puede definir como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno por unidad de ancho y de altura igual al manto permeable saturado bajo un gradiente unitario.

La permeabilidad y la transmisibilidad están ligadas a las características físicas de las rocas almacén. Por lo tanto las condiciones del flujo dependerán directamente de dichas características.

## II.B CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

Las características fisicoquímicas de las aguas subterráneas son muy numerosas, se analizarán en particular las características fisicoquímicas utilizadas en prospección hidrogeológica.

Temperatura.

Conductividad, resistividad y resistencia eléctricas.

pH.

Hidroquímica.

La temperatura, la resistividad y las sales disueltas frecuentemente se comportan como marcadores naturales que permiten estudiar las características hidrogeológicas de la capa acuífera y los parámetros del flujo subterráneo.

Las normas fisicoquímicas, tales como concentración en sales disueltas y la temperatura, se suelen determinar en función de su utilidad: aguas potables, industriales, riego o terapéuticas.

Así pues, las características fisicoquímicas de las aguas subterráneas pueden limitar su utilización e indirectamente la importancia de los recursos explotables.

## II.6 PROPIEDADES FISICAS GENERALES

### II.6.1 Masa volumétrica

La masa volumétrica,  $\rho$ , es la masa por unidad de volumen. En el agua pura, a 4°C, es igual convencionalmente, a 1 g/cm<sup>3</sup> a la presión de 1 atmósfera. La masa específica máxima a 4°C (más

exactamente entre 3.68 y 4.08°C), disminuye con la temperatura y aumenta en el mismo sentido que la presión (ver tabla 2.1).

### II.6.2 Peso específico

El peso específico,  $\gamma$ , es igual al producto de la masa volumétrica,  $\rho$ , por la aceleración de la gravedad,  $g$ , del lugar:

$$\gamma = \rho g$$

El peso específico del agua es, con  $g = 981 \text{ cm/s}^2$ , a 4°C, igual a 0.981  $\text{g/cm}^3$ .

### II.6.3 Densidad

La densidad,  $d$ , es la relación entre la masa volumétrica del cuerpo considerado y la del agua pura a 4°C y a la presión atmosférica, varía en función de los mismos factores y en el mismo sentido, es decir, es función inversa de la temperatura (por encima de los 4°C) y directa de la presión, (ver tabla 2.1).

TABLA 2.1 Masa volumétrica o densidad y volumen en función de las variaciones de temperatura.

| TEMPERATURA<br>[°C] | DENSIDAD<br>g/cm <sup>3</sup> | VOLUMEN<br>cm <sup>3</sup> | TEMPERATURA<br>[°C] | DENSIDAD<br>g/cm <sup>3</sup> | VOLUMEN<br>cm <sup>3</sup> |
|---------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------|
| 0                   | 0.99986                       | 1.00013                    | 60                  | 0.98324                       | 1.01705                    |
| 4                   | 1.00000                       | 1.00000                    | 70                  | 0.97781                       | 1.02270                    |
| 10                  | 0.99972                       | 1.00027                    | 80                  | 0.97183                       | 1.02899                    |
| 20                  | 0.99823                       | 1.00172                    | 90                  | 0.96534                       | 1.03590                    |
| 30                  | 0.99567                       | 1.00434                    | 100                 | 0.95338                       | 1.04343                    |
| 40                  | 0.99224                       | 1.00782                    | 150                 | 0.91730                       | 1.09020                    |
| 50                  | 0.98807                       | 1.01207                    | 200                 | 0.86280                       | 1.15900                    |

#### 11.6.4 Viscosidad

La viscosidad dinámica o absoluta  $\mu$  del agua es de 0.01006 poises a 20°C (1 poise = 1 dina/cm<sup>2</sup>). Dado que los valores de la viscosidad son muy bajos, se utiliza como unidad al centipoise (1 poise = 100 centipoises). La viscosidad absoluta del agua es, 1 centipoise, a 20.3°C, y esta decrece rápidamente con el aumento de la temperatura, T, hasta 30°C, y a partir de aquí decrece más lentamente (tabla 2.2).

La viscosidad cinemática  $\nu = \mu/\rho$  del agua a 12°C es de  $1.24 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s. Varía en función de la temperatura. La fórmula de Poiseville permite efectuar las correcciones por temperatura.

$$\nu = \frac{0.0178}{1 + 0.337 T + 0.000221 T^2}$$

Donde:

T, Temperatura en (°C).

TABLA 2.2 Viscosidad del agua, en centipoises, en función de la presión y la temperatura.

| Temperatura<br>°C | Agua destilada<br>a la presión<br>atmosférica | Agua destilada<br>a 500 bares | Agua destilada<br>a 1000 bares |
|-------------------|---|-------------------------------|--------------------------------|
| 0                 | 1.797   | 1.688                         | 1.658                          |
| 10                | 1.301   | 1.359                         | 1.337                          |
| 20                | 1.006   | -----                         | -----                          |
| 30                | 0.800   | 0.900                         | 0.925                          |
| 40                | 0.656   | -----                         | -----                          |
| 50                | 0.550   | -----                         | -----                          |
| 75                | 0.414   | 0.414                         | 0.430                          |
| 100               | 0.280   | -----                         | -----                          |

## II.7 TEMPERATURA

El estudio sistemático de las temperaturas de las aguas subterráneas medidas en las surgencias (fuentes) o en la capa acuifera (pozos, sondeos o piezómetros), aporta datos sobre su origen y su flujo. La medición de la temperatura es obligatoria en los estudios de resistividad o de conductividad eléctrica. El agua de lluvia, que tiene temperatura propia tiende a ponerse en equilibrio térmico con el suelo.

### II.7.1 Temperatura del suelo

La temperatura del suelo, proviene de dos fuentes principales de calor que son: el sol y el grado geotérmico, el calor solar que es el más importante en el caso de la capa superficial, sufre variaciones diarias y anuales y se propaga de arriba a abajo.

En profundidad existe un flujo constante de calor que proviene del interior de la tierra, y está caracterizado por el gradiente geotérmico.

En el subsuelo se pueden distinguir, de arriba a abajo, dos zonas térmicas. La zona heterotérmica y la zona homotérmica.

Zona Heterotérmica del suelo. Esta zona sometida al flujo calorífico del sol, cuya profundidad es de 15 a 17 m en los suelos normales, de 24 a 27 m en las calizas y de 34 a 39 m en los granitos, comprende dos subzonas:

1 La subzona superior, de 1 a 2 m de potencia en las rocas compactas, está influenciada por las variaciones diarias de la temperatura del aire. Es la subzona de heterotermia diaria.

2 La subzona inferior, o subzona de heterotermia anual, no está influenciada por las variaciones diarias de la temperatura del aire, pero sí lo está por las fluctuaciones anuales.

La zona heterotérmica tiene muy poca importancia en cuanto a la temperatura de aguas subterráneas.

Zona Homotérmica del suelo. En profundidad la temperatura es debida al flujo calorífico, constante en un mismo lugar, que proviene del interior de la tierra. Es más débil que el del origen solar. Está relacionado con el gradiente geotérmico, el cual, por convenio, es la distancia vertical en que la temperatura del suelo aumenta 1°C, su valor, en principio varía según la naturaleza de la roca.

La estructura geológica y la presencia de focos secundarios de calor como:

Los fenómenos de disolución de las sales y las reacciones químicas exotérmicas o endotérmicas (absorción de calor) y el calor producido por la expansión del agua, especialmente las aguas de origen profundo. Debido a la presencia de estos focos puede disminuir la temperatura hasta 20°C o bien aumentar hasta 40°C.

Temperatura de las aguas subterráneas.- El agua de lluvia que se filtra en el suelo, penetra en las capas profundas, atraviesa las diferentes zonas térmicas, y tiende a ponerse en equilibrio con la temperatura de la capa.

#### II.7.2 Medición de la temperatura de las aguas subterráneas

La medición de la temperatura se efectúa directamente en las fuentes (pozos) o en las capas acuíferas, con ayuda de obras, el agua de los pozos o sondeos se puede recoger en un recipiente que se sube rápidamente a la superficie y en la cual se mide la temperatura, la precisión del termómetro utilizado debe ser de 1/10 de grado. Las mediciones exactas se realizan con sondas termo-eléctricas.

## II.8 CONDUCTIVIDAD Y RESISTIVIDAD ELECTRICAS

La conductividad eléctrica, o bien su inversa que es la resistividad, es un medio importante de investigación en hidrología, su medición, rápida y exacta, no requiere ni tomas dificultosas ni aparatos complicados. Sus variaciones están estrechamente ligadas, a temperatura constante, con las variaciones de la mineralización de las aguas subterráneas.

Unidades de medida.- La unidad de resistividad, R, es el ohm-cm.

$$1 \text{ ohm cm} = 10^{-2} \text{ ohm - m}$$

$$100 \text{ ohm cm} = 1 \text{ ohm m}$$

### II.8.1 Influencia de los distintos factores

Variaciones con la temperatura. La resistividad decrece cuando la temperatura aumenta.

Factor de corrección por temperatura:

$$A = \frac{1}{1 - C(T_0 - T)}$$

Donde:

$T_0$ , es la temperatura estándar de 18, 20 ó 25°C.

T, es la temperatura medida.

C, constante; C = 0.021 a 0.022

TABLA 2.3 Algunos valores de la resistividad del agua.

| Tipo de agua                   | Resistividad<br>(ohm-cm) |
|--------------------------------|--------------------------|
| Agua pura                      | superior a 20,000        |
| Agua poco mineralizada         | 5,000 a 10,000           |
| Agua medianamente mineralizada | 2,000 a 4,000            |
| Agua muy mineralizada          | 400 a 100                |

Acción de la concentración de las sales disueltas.

La resistividad disminuye mientras mayor sea la concentración de sales disueltas en el agua.

Medición de la resistividad del agua.

Toma de muestras.- Se deben tomar con precaución, en frascos herméticamente cerrados, la medición debe efectuarse lo más rápidamente posible; se aconseja realizar la operación sobre el terreno con aparatos portátiles, tipo puente de Kohlrausch. La medición se basa en el cálculo de la resistencia, se realiza con ayuda de un puente de Wheatstone adaptado (figura 2.1).

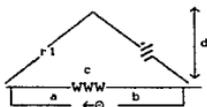


fig. 2.1 Principio del puente de medición de las resistividades del agua.

Principio de medición.- La muestra de agua está contenida en una unidad de medida constituida por dos electrodos de platino, recubiertos por una delgada capa de negro de platino, para evitar la polarización, los electrodos están colocados verticalmente en el agua de tal forma que las burbujas de aire no se adhieran a su superficie. El puente lleva consigo resistencias escalonadas de 10, 100 y 1000 ohms, una aguja C, que se desplaza frente a una graduación, permite establecer la resistencia variable. El ajuste se puede conocer mediante un sonido o bien electrónicamente, da el valor de la relación  $b/a$ , la resistencia del agua viene dada por la expresión:

$$\text{Resistencia en ohms} = r(10, 100 \text{ ó } 1000)b/a$$

La temperatura se toma con una precisión de 1/10 de °C.  
 Donde el coeficiente de calibración de la unidad de medida se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C = A \frac{1210}{r}$$

Conociéndose el coeficiente de calibración, la resistividad R es igual a:

$$R = C \times \frac{r}{A}$$

Donde:

r, resistencia medida a la temperatura de T °C

A, es un factor de corrección que permite llevar la resistividad a la temperatura estándar, 18°C, se obtiene a partir de tablas.

## II.9 EL pH.

Definición. La molécula de agua está ligeramente ionizada en iones H<sup>+</sup> y OH<sup>-</sup>. Algunos autores prefieren hablar del hidrónion H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> en lugar del catión H<sup>+</sup>, ya que éste, siendo un protón, no puede existir en estado libre. El pH de una solución es el inverso del logaritmo de la concentración en iones H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>.

$$pH = \log \frac{1}{[H_3O^+]} = 1 \log \frac{1}{[H^+]^3}$$

$$pH = - \log [H_3O^+] = 1 \log [H^+]$$

Para el agua: [H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>][OH<sup>-</sup>] = constante, siendo esta constante aproximadamente igual a 10<sup>-14</sup>, a 25°C. El pH correspondiente al agua pura es: [H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>] = [OH<sup>-</sup>] = 10<sup>-7</sup> aproximadamente iones H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> por litro. En el agua pura existe una molécula disociada por cada 10<sup>6</sup> moléculas de agua.

$$pH = - \log \frac{1}{10^{-7}} = 7$$

## II.9.1 Influencia de los diferentes factores

El pH varía en función de la temperatura y de la fuerza iónica.

Acción de la temperatura. El pH determinado a una temperatura estándar de 25 °C, decrece con el aumento de la temperatura (tabla 2.4) alrededor de los 25 °C el pH disminuye 0.01 por grado de elevación de temperatura.

TABLA 2.4 Valores del pH en función de la temperatura.

| Temperatura °C | pH   |
|----------------|------|
| 0              | 7.44 |
| 4              | 7.38 |
| 10             | 7.24 |
| 18             | 7.08 |
| 22             | 7.02 |
| 25             | 7.00 |
| 30             | 6.90 |
| 40             | 6.70 |
| 50             | 6.62 |
| 100            | 6.13 |

Acción de la fuerza iónica.

|              |             |
|--------------|-------------|
| Medio neutro | pH = 7      |
| Medio ácido  | pH < 7      |
| Medio básico | 7 < pH < 14 |

Medida del pH. La medición del pH se puede efectuar rápidamente sobre el terreno, siendo preferible esta técnica a la determinación en el laboratorio, puesto que se requiere de un transporte de las muestras que podría modificar el pH inicial, lo cual siempre es molesto. Existe un indicador universal, que permite estimar el pH entre 1 y 10 con aproximación de casi una unidad, se compone de:

100 mg de fenolftaleína  
200 mg de metil rojo  
300 mg de dimetilaminoazobenceno  
400 mg de azul de bromotimol  
200 mg de azul de timol

Disueltos en 500 ml de alcohol etílico, se añade un poco de alcali para obtener un color amarillo, los virajes dan el pH, rojo para pH = 2, naranja para pH = 4, amarillo pH = 6, verde pH = 8.5 y azul para pH = 10, la cantidad media de indicador que se utiliza es de 5 cm<sup>3</sup> de agua.

## II.10 HIDROQUIMICA

El estudio de la química de las aguas subterráneas o hidroquímica, aporta una gran ayuda a la hidrogeología. Es un método sencillo de prospección que de un modo útil completa los mapas piezométricos. Permite comparar las aguas entre si, y resolver, en una capa acuífera determinada o en una estructura hidrogeológica, problemas de alimentación, de drenaje y de flujo.

Disociación de las moléculas.- Cuando una sal se disuelve en agua, su molécula se disocia en iones electropositivos o cationes y electronegativos o aniones. El grado de disociación es la relación entre el número de moléculas disociadas y el número de moléculas totales de la disolución.

Equivalente químico. Los aniones y los cationes sólo se pueden disociar o combinar entre ellos en una unidad de masa determinada, el equivalente se expresa como:

Equivalente = unidad de masa / 2

TABLA 2.5 Masas atómicas, valencias y equivalentes de los principales iones.

| ION O RADICAL                  | MASA ATOMICA | VALENCIA | EQUIVALENTE |
|--------------------------------|--------------|----------|-------------|
| <b>ANION</b>                   |              |          |             |
| Cl <sup>-</sup>                | 35.5         | 1.0      | 35.5        |
| OH <sup>-</sup>                | 17.0         | 1.0      | 17.0        |
| SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>  | 96.0         | 2.0      | 48.0        |
| CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>  | 60.0         | 2.0      | 30.0        |
| CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup> | 61.0         | 1.0      | 61.0        |
| <b>CATION</b>                  |              |          |             |
| Mg <sup>++</sup>               | 24.0         | 2.0      | 12.0        |
| H <sup>+</sup>                 | 1.0          | 1.0      | 1.0         |
| Na <sup>+</sup>                | 23.0         | 1.0      | 23.0        |
| Ca <sup>++</sup>               | 40.0         | 2.0      | 20.0        |
| K <sup>+</sup>                 | 36.0         | 1.0      | 36.0        |

Unidades de concentración, Miliequivalentes.- La unidad de concentración es el equivalente por litro, y es el número de equivalentes contenido en el peso del elemento, expresado en gramos, disuelto en un litro de agua.

Ejemplo:

Sea una solución que tenga 150 mg/l del ión Ca<sup>++</sup>, entonces  
 $\text{mg/l} = 150/20 = 7.5$

#### II.10.1 Análisis químico de las aguas subterráneas

Los principales datos del análisis químico de las aguas subterráneas son:

Los elementos químicos

El residuo seco

La valoración alcalimétrica

El grado hidrotimétrico

Elementos químicos. Los principales elementos analizados en el agua con relación al estudio hidroquímico son:

Cationes: Ca, Mg, Na, K

Aniones:  $\text{SO}_4$ , Cl,  $\text{CO}_3$ ,  $\text{CO}_3\text{H}$

Los resultados se pasan a forma iónica y se expresan en miligramos por litro o ppm.

$1 \text{ mg/l} = 1 \text{ ppm}$

Residuo seco. El residuo seco, Rs, expresado en miligramos por litro, representa la totalidad de las sales disueltas, es un dato de la mineralización total del agua que está estrechamente relacionado con la resistividad.

Valoración Alcalimétrica (alcalimetría). Es aquella que permite conocer el contenido de carbonato, bicarbonatos e hidratos alcalinos existentes en el agua. Este contenido se mide con la ayuda de una solución valorada de ácido sulfúrico en presencia de fenoftaleína, naranja de metilo o helioantina. En el primer caso se obtiene la alcalinidad TAY en el segundo la alcalinidad total TAC. Estos valores se expresan en miliequivalentes por litro o en grados franceses. El grado francés corresponde a diez miligramos de carbonato cálcico o a cuatro miligramos de óxido de magnesio por litro. Del mismo modo corresponde a 0.2 miliequivalentes por litro.

Dureza del agua (Grado hidrotimétrico). Dicho grado indica el contenido en sales de calcio y de magnesio en el agua.

Grado hidrotimétrico permanente. Da el contenido global en sulfatos y cloruros de calcio y magnesio.

Grado hidrotimétrico magnésico total. Da el contenido global en sal de magnesio.

Grado hidrotimétrico magnésico permanente. Da el contenido en sulfatos y cloruros de magnesio.

## II.10.2 Interpretación de resultados del análisis químico

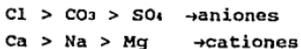
### Principales factores en la interpretación.

Cantidades en reacción. La primera operación para la interpretación de resultados de dicho análisis consiste en calcular los miliequivalentes por litro en cada elemento. Por ejemplo, para el calcio se tiene:

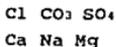
$$\text{me/l Ca} = 124/20 = 6.2$$

donde: 6.2 es la cantidad en reacción.

Comparaciones iónicas. Las comparaciones iónicas se basan en el establecimiento de la fórmula iónica. Esta fórmula característica del agua estudiada, se obtiene clasificando de izquierda a derecha, en orden decreciente de las cantidades en reacción por cien, empezando primero por el grupo de los tres aniones y luego el de los tres cationes. Por ejemplo, la fórmula iónica de las aguas del Yebel Zaghouan, será:



o de forma más sencilla:



La fórmula iónica pone de manifiesto el contenido relativo de los diferentes elementos y permite conocer las aguas subterráneas del mismo origen y comparar la composición química de las aguas con características fisicoquímicas de la roca almacén, de la cual proviene. Mediante las tablas (2.6 a 2.10) se estudiarán las relaciones entre la fórmula iónica y las características fisicoquímicas de la roca almacén.

TABLA 2.6 Cantidades en reacción, referidas a cien, del agua de las calizas del Karst de Montpellier (Francia).

| Nombre del punto de agua | Ca | Mg   | Na  | Cl  | SO <sub>4</sub> | CO <sub>3</sub> |
|--------------------------|----|------|-----|-----|-----------------|-----------------|
| Manantial de Lez         | 43 | 3.7  | 3.5 | 5.3 | 3.6             | 41              |
| Vernede                  | 47 | 2.8  | 1.2 | 4.3 | 2.9             | 44              |
| Manantial de Oules       | 35 | 13.2 | 1.6 | 3.0 | 2.7             | 44.6            |

La fórmula iónica es:

CO<sub>3</sub> Cl SO<sub>4</sub> Ca Mg Na

TABLA 2.7 Cantidades en reacción, referidas a cien, del agua de las arenas miopliocenas de Djérid (sur de Túnez).

| Nombre del punto de agua | Ca   | Mg   | Na   | Cl   | SO <sub>4</sub> | CO <sub>3</sub> | R SI<br>mg/l |
|--------------------------|------|------|------|------|-----------------|-----------------|--------------|
| Tozeur                   | 17.3 | 15.2 | 18.2 | 18.6 | 26.7            | 3.8             | 2077         |
| Nefta                    | 19.0 | 11.6 | 20.0 | 18.6 | 27.0            | 4.2             | 2855         |

La fórmula iónica es:

SO<sub>4</sub> Cl CO<sub>3</sub> Na Ca Mg

TABLA 2.8 Cantidades en reacción, referidas a cien, del agua de las formaciones cuaternarias de la llanura de Kairouan (Túnez)

| Nombre del punto de agua | Ca   | Mg  | Na   | Cl   | SO <sub>4</sub> | CO <sub>3</sub> | R SI<br>mg/l |
|--------------------------|------|-----|------|------|-----------------|-----------------|--------------|
| Pozo 3262                | 17.6 | 9.6 | 23.5 | 26.5 | 12.9            | 9.9             | 1170         |
| Pozo de Sidi Ferhatt     | 17.7 | 7.0 | 25.9 | 25.6 | 13.2            | 11.5            | 1261         |

La fórmula iónica es:

Cl SO<sub>4</sub> CO<sub>3</sub> Na Ca Mg

TABLA 2.9 Cantidades en reacción, referidas a cien, del agua de un complejo de calizas dolomíticas, yeso y esquistos de la región de Hyères (sur de Francia).

| Nombre del punto de agua | Ca   | Mg  | Na   | Cl  | SO <sub>4</sub> | CO <sub>3</sub> |
|--------------------------|------|-----|------|-----|-----------------|-----------------|
| Manantial de la Vierge   | 22.0 | 6.0 | 21.6 | 2.1 | 9.7             | 37.1            |
| Aiguedor                 | 23.5 | 3.8 | 24.0 | 2.3 | 5.1             | 42.5            |

La fórmula iónica es:

Ca Na Mg CO<sub>3</sub> SO<sub>4</sub> Cl

Si se analizan las fórmulas iónicas y las características fisicoquímicas de la naturaleza de las rocas almacén, obtendremos, la tabla 2.10.

TABLA 2.10 Relación entre la fórmula iónica y las características fisicoquímicas de la roca almacén.

| característica dominante | característica secundaria                             | Fórmula iónica                              |
|--------------------------|---|---|
| Caliza                   | Dolomítica  | CO <sub>3</sub> SO <sub>4</sub> Cl Ca Mg Na |
| Caliza                   | Dolomítica, yeso, cloruros (invasión del agua de mar) | CO <sub>3</sub> SO <sub>4</sub> Cl Ca Mg Na |
| Caliza                   | Cloruros (intercalaciones arcillosas)                 | CO <sub>3</sub> Cl SO <sub>4</sub> Ca Na Mg |
| Caliza                   | Dolomías  | CO <sub>3</sub> Cl SO <sub>4</sub> Ca Mg Na |
| Arenas y arcillas        | Cloruros  | Cl SO <sub>4</sub> CO <sub>3</sub> Na Ca Mg |
| Arenas y Yeso            | Cloruros  | SO <sub>4</sub> Cl CO <sub>3</sub> Na Ca Mg |

Se consta que la fórmula iónica, es idéntica para todos los puntos de agua de una misma capa acuifera y característica del agua subterránea que contiene; diferente para las distintas capas acuíferas y relacionada con las características fisicoquímicas de la roca almacén.

Relaciones características. Se le llama relación característica a la relación de ciertos elementos químicos expresados en cantidad en reacción. Las relaciones utilizadas para el estudio hidroquímico son:

$$\frac{r_{Mg}}{r_{Ca}} \quad \frac{r_{SO_4}}{r_{Cl}} \quad \frac{r_{Na}}{r_{Cl}}$$

El estudio de las variaciones de estas relaciones suministra importantes datos sobre la alimentación y el flujo de las aguas subterráneas.

Diagramas. Los resultados de los análisis químicos se llevan sobre diagramas que permiten definir claramente los tipos de agua y comparar las aguas entre sí. En este trabajo se presenta un diagrama básico que permite clasificar las aguas subterráneas de acuerdo a su contenido iónico (diagrama 2.1); su uso es sencillo, del análisis químico se establece el contenido iónico de los principales elementos y se entra al diagrama uniendo mediante líneas rectas que representan el porcentaje de iones, donde se interceptan, es el punto que marca el tipo de agua que se analiza.

Por último en el cuadro 2.1 y 2.2 se presentan los resultados y conclusiones del análisis químico de una agua para uso potable; así como Estandares Internacionales establecidos.

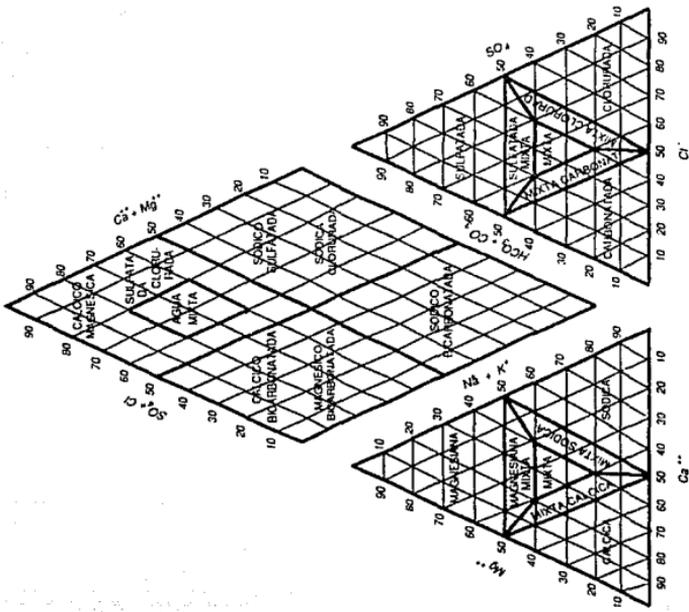


Diagrama 2.1. CLASIFICACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN BASE A SU CONTENIDO IONICO

**CUADRO 2.1****SOLIDOS TOTALES DISUELTOS  
EN ppm EN LAS AGUAS POTABLES****Constituyentes principales de (1.0 a 1000 ppm)****CATIONES****Sodio  
Magnesio  
Calcio  
Silice****ANIONES****Bicarbonato  
Cloro  
Sulfato****Constituyentes secundarios (de 0.01 a 10.0 ppm)****Hierro  
Estroncio  
Potasio****Carbonato  
Nitrato  
Fluoruro  
Boro****Constituyentes menores (de 0.0001 a 0.01 ppm)****Antimonio  
Litio  
Bario  
Niquel  
Cromo  
Selenio  
Germanio  
Vanadio****Plomo  
Arsénico  
Molibdeno  
Cadmio  
Rubidio  
Cobre  
Uranio  
Zinc****Aluminio  
Manganeso  
Bromo  
Fosfato  
Cobalto  
Titanio  
Iodo****Constituyentes Trazas (gralmente. en cantidades < a 0.0001 ppm)****Berilio  
Escandio  
Cesio  
Torio  
Indio  
Yterbio  
Platino****Rutenio  
Cerio  
Tallio  
Oro  
Tungsteno  
Niobio  
Arconio****Bismuto  
Paltra  
Galio  
Estaño  
Lantano  
Ytrio  
Radio**

## CUADRO 2.2

## ESTANDARES INTERNACIONALES PARA AGUA(OHMS - 1971)

### NIVEL MAXIMO PERMISIBLE

g/m<sup>3</sup>

| SUSTANCIA                             | PARA USO DOMESTICO | PARA BEBER             |
|---------------------------------------|--------------------|------------------------|
| Arsénico (As) *                       | .....              | 0.05                   |
| Calcio (Ca)                           | 200                | .....                  |
| Cadmio (Cd) -                         | .....              | 0.01                   |
| Cromo (Cr) *                          | 0.05               | .....                  |
| Cobre (Cu)                            | 1.50               | .....                  |
| Hierro (Fe)                           | 1.00               | 0.10                   |
| Plomo (Pb) *                          | 150.0              | .....                  |
| Magnesio (Mg)                         | 0.50               | .....                  |
| Manganeso (Mn)                        | .....              | 0.0001                 |
| Mercurio (Hg)                         | .....              | 0.01                   |
| Selenio (Se)                          | 15.0               | .....                  |
| Zinc (Zn)                             | .....              | 0.05                   |
| Amonio                                | 1.00               | .....                  |
| Detergente aniónico                   | 500                | .....                  |
| Cloro (Cl)                            | .....              | 0.05                   |
| Cianuro (Cn)                          | .....              | 1.70                   |
| Fluoruro (de 10 - 12 Cl)              | 0.30               | .....                  |
| Acidez mineral                        | .....              | 45.0                   |
| Nitratos (NO <sub>3</sub> ) *         | .....              | 1.00                   |
| Fenol                                 | 0.002              | .....                  |
| Hidrocarburos policíclicos aromáticos | .....              | 0.20                   |
| Sulfatos                              | 400                | .....                  |
| Radio nucleos alta actividad          | .....              | 3 pCi/l                |
| Radio nucleos baja actividad          | .....              | 30 pCi/l               |
| Bacterias coliformes                  | .....              | 10 <sup>3</sup> /100cm |
| DBO                                   | .....              | 5.00                   |
| DOO                                   | .....              | 10.00                  |
| pH                                    | .....              | .....                  |
| Dureza total (CaCO <sub>3</sub> )     | 6.50 - 9.2         | .....                  |
| Sólidos totales disueltos             | 500.0              | .....                  |
|                                       | 1500               | .....                  |

\* Altamente tóxicos.

+ Si sobrepasan la norma, son tóxicos.

# *CAPITULO III*

## *GEOMETRIA DEL SISTEMA*

### III.1 INTRODUCCION

Un acuífero es un elemento de un sistema complejo de recursos geohidrológicos, que tiene sus leyes particulares de funcionamiento.

Un sistema comprende un conjunto de elementos físicos y geométricos, unas acciones exteriores que actúan sobre él y unas leyes de funcionamiento.

Los elementos físicos pueden ser la transmisibilidad, coeficiente de almacenamiento, permeabilidad, etc., los elementos geométricos pueden ser la forma, límites laterales, superiores, etc.

Existen también algunas variables que dependen principalmente del tiempo, como las alturas piezométricas, componentes del vector velocidad, concentración química, radio de drenaje, etc.

Las acciones exteriores que se dan en el sistema pueden ser controlables e incontrolables. Las primeras se llaman variables de decisión y sirven para llegar a un objetivo, como pueden ser bombeos, recargas artificiales y drenajes. Las segundas se dividen en determinísticas y estocásticas. Las determinísticas dependen del estado del sistema, como drenaje a manantiales, ríos o a través de una capa confinante. Las estocásticas dependen de factores hidrológicos y climatológicos, como recarga natural de un acuífero, de un río influente a un acuífero.

Las formaciones se presentan casi en una cantidad ilimitada de formas, tamaños y orientaciones, es claro que el funcionamiento de un sistema acuífero estará regido por la orientación y forma física del mismo, es decir; de la geometría, la cual se tratará de definir en el presente capítulo.

### III.2 GEOLOGIA

#### Litología, Estratigrafía y estructura.

La naturaleza y distribución de acuíferos y acuitardos en un sistema geológico es controlado por la litología, estratigrafía, y estructura de los depósitos geológicos y formaciones. La litología es de carácter físico, incluyendo la composición mineral, tamaño de grano y relleno de éste, de los sedimentos o rocas de las cuales se tiene la naturaleza de los sistemas geológicos. La estratigrafía describe la geometría y la relación de años entre varios cuerpos lenticulares, lechos y formaciones en los sistemas geológicos de origen sedimentario. Rasgos estructurales, semejantes como grietas, fracturas, pliegues, y fallas son las propiedades geométricas de los sistemas geológicos producidos por deformación después de depositación o cristalización. En los depósitos no consolidados, la litología y la estratigrafía constituyen el más importante control. En más regiones conocidas de la litología, estratigrafía, y estructuras están dirigidas directamente a un entendimiento de la distribución de acuíferos y acuitardos.

#### III.2.1 Rocas no consolidadas

Los acuíferos se encuentran en su mayor parte en estas rocas, ya que su permeabilidad suele ser mucho más elevada que las demás formaciones geológicas, además de que los depósitos tienen una ubicación favorable para recibir una recarga de ríos o lagos.

#### Depósitos de origen fluvial

Los materiales depositados están constituidos por gravas, arenas, limos y arcillas, cuya composición mineralógica y/o petrográfica depende en gran parte de la roca madre que la

precede . Los cuerpos de agua son simultáneamente un agente de erosión, de transporte y/o de sedimentación. Los depósitos en el propio cauce del río son más gruesos-arenas y gravas principalmente; sobre la llanura de inundación el agua suele circular con mucha menor velocidad y los depósitos suelen ser las arenas finas, limos y arcillas. Un ejemplo de este tipo de depósito se muestra en la figura 3.1.

#### Depósitos en los valles de origen tectónico

Desde el punto de vista geológico muchos de los grandes valles o amplias depresiones, corresponden a fosas tectónicas, es decir, a zonas de la corteza terrestre que están o han estado en un proceso más o menos continuo de hundimiento.

Estas grandes depresiones contienen enormes cantidades de materiales sueltos por lo general bastante porosos y más o menos permeables.

Los depósitos que rellenan estas cuencas son de tipo mucho más diversificado, pues no sólo son de origen fluvial, sino que suelen estar también representados materiales de origen lacustre, eólico, glaciario, piroclástico, etc. El material es producto de la misma roca adyacente o material cercano a ella. Un ejemplo de este tipo de depósito se muestra en la figura 3.2.

#### Depósitos de origen eólico

Los representantes más típicos de este tipo de depósitos son los loess y las dunas. Las dunas están formadas por arenas de un tamaño extraordinariamente uniforme cuya mediana suele oscilar entre 0.1 y 0.3 mm, es decir, se trata de arenas finas, y predominan los granos de tipo silicio.

FIGURA 3.1

VALLE TIPO FLUVIAL

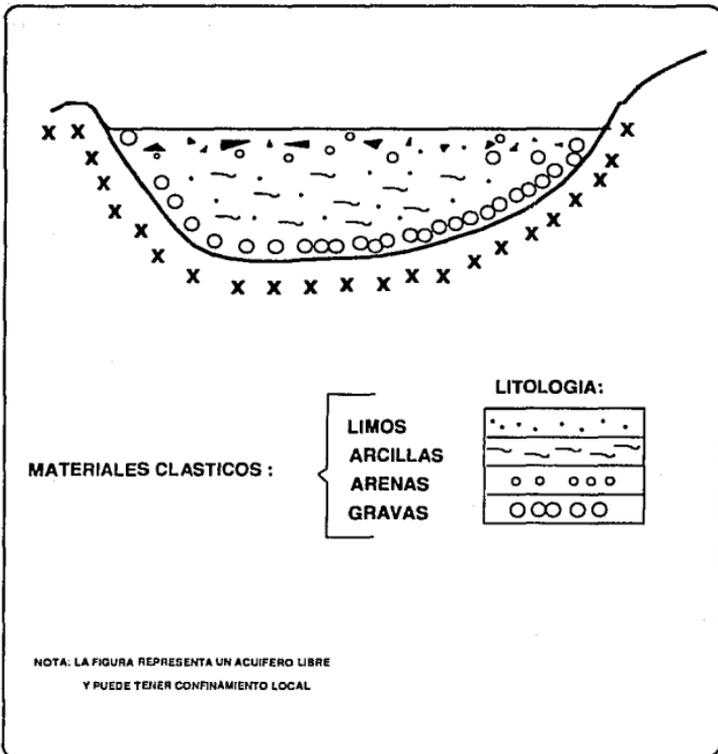
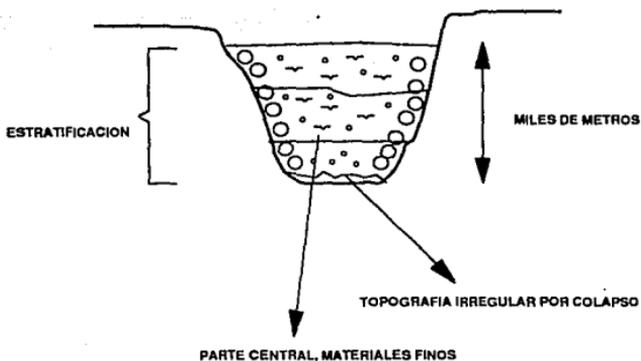


FIGURA 3.2

FOSA



NOTAS:

1. EL DEPOSITO DEL MATERIAL FUE EN FORMA TRANQUILA, DE AHI SU ESTRATIFICACION
2. EL ACUIFERO PUEDE SER SEMICONFINADO Y CON CONFINAMIENTO REGIONAL
3. SI EXISTIERA TECTONICA, POR EJEMPLO UNA FALLA, YA NO EXISTIRIA ESTRATIFICACION Y POR FRICCION DE MATERIALES HABRIA FUNDICION DE ELLOS POR LO TANTO, LA PERMEABILIDAD SE REDUCE.

Los loess suelen tener también un tamaño muy uniforme pero mucho más pequeño, sus partículas corresponden predominantemente a limos y arcillas, de 0.06 a 0.002 mm. Como es lógico, cuando más próximo a la roca madre es el material, menos uniforme será, en caso contrario se tendrá un material muy regular en tamaño.

En general, estas rocas no pueden ser consideradas como acuíferos, pero pueden constituir una interesante roca almacén o acuitardo y también suelen tener una elevada capacidad de infiltración.

#### Depósitos en llanuras costeras

En los sedimentos de las llanuras costeras se mezclan materiales de origen continental y de origen marino en general, predominan los materiales más finos a medida que aumenta la distancia del (hinterland).

Los materiales permeables de origen continental suelen ser gravas y arenas fluviales o dunas eólicas; los de origen marino, arenas y gravas de playa, más o menos cementados y muy pocas veces calizas. Un ejemplo de este tipo de depósito se muestra en la figura 3.3.

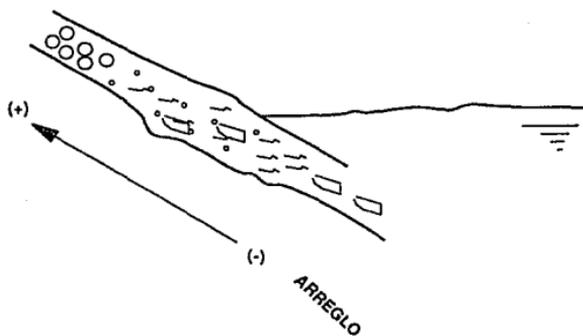
Papel de la tectónica en rocas no consolidadas.

Los sedimentos no consolidados corresponden casi siempre a materiales depositados en épocas geológicas recientes, por lo general del cuaternario o del terciario superior.

El estudio de las fallas tiene importancia, no sólo para comprender la situación del zócalo de las fosas tectónicas, sino también en cuanto afectan a los propios sedimentos terciarios y cuaternarios y dan lugar a la formación de barreras o límites semipermeables que aíslan distintas zonas hidrológicas dentro de una misma fosa o graben.

FIGURA 3.3

PLANICIES



NOTAS:

1. LAS PLANICIES SON UNA MEZCLA DE FOSAS Y VALLES DE TIPO FLUVIAL.
2. EN LA PARTE SUPERIOR PUEDEN EXISTIR ACUIFEROS LIBRES Y SEMICONFINADOS.
3. EL ARREGLO DE MATERIALES DEPENDE DE LA PENDIENTE.
4. EN EL FONDO HAY MATERIALES FINOS Y EN LA SUPERFICIE GRUESOS.

#### Porosidad (en rocas no consolidadas)

La porosidad total de este tipo de sedimentos no consolidados, suele ser muy superior a la de las demás formaciones geológicas, oscila entre 0.20 para aluviones gruesos y poco clasificados, hasta un 0.90 para fangos blandos; lo más común es que estos valores oscilan entre 0.25 y 0.65. La porosidad efectiva, oscila entre casi cero y 0.5. Los valores típicos de los limos y de las arcillas son inferiores a 0.1. Las gravas y las arenas gruesas casi siempre tienen valores superiores a 0.20.

#### Permeabilidad (en rocas no consolidadas)

Los aluviones de origen fluvial suelen presentar casi siempre lentejones o zonas de material aceptablemente permeable o muy permeable. Las zonas de gravas y arenas gruesas, con frecuencia están en la parte baja y bien pueden tener permeabilidades comprendidas entre 1 y 100 m/día.

Los limos más o menos arcillosos o arenosos, son mucho menos permeables y sus valores comprenden de  $10^{-1}$  y  $10^{-3}$  m/día.

Los depósitos de los valles de origen tectónico, la permeabilidad en conjunto, suele ser más reducida que en los aluviones. Las zonas permeables normalmente formadas por gravas de paleocauces o por conglomerados, o por dunas que han sido fosilizadas por depósitos posteriores. En conjunto, estos materiales gruesos suelen ser más abundantes en las zonas próximas a los bordes de la fosa tectónica, en las zonas centrales pueden predominar de modo casi absoluto los materiales finos o las rocas evaporíticas, las cuales no son permeables.

Los loess en general son poco permeables, y su permeabilidad oscila entre 1 y  $10^{-4}$  m/día. La permeabilidad de las dunas es mucho más constante y puede considerarse que oscilará con probabilidad entre 5 y 10 m/día.

Las variaciones en la permeabilidad de los depósitos costeros no consolidados, son relativamente análogos a las variaciones descritas en los valles de origen tectónico. Las zonas permeables de gravas y arenas tendrán probablemente permeabilidades que fluctúan entre 1 y 100 m/día.

Los depósitos glaciares de tipo morrénico suelen ser poco permeables; en cambio los eskers y kames formados por materiales de mayor tamaño, pueden constituir excelentes acuíferos.

#### Calidad del agua

Las características físicas y químicas de las aguas subterráneas depende de varios factores. Los tres principales son: El ambiente climático, ambiente geológico y la acción del hombre.

En las rocas sedimentarias no consolidadas sus características- litológicas dependen esencialmente de la roca madre de la que proceden. En las zonas permeables de las rocas no consolidadas suelen predominar rocas poco solubles, de tipo silíceo, y por consiguiente, en su paso por estos materiales el agua no tiende a aumentar mucho su contenido en sales totales disueltas. Cuando las aguas atraviezan zonas con mayor o menor contenido de limos y arcillas, se producen fenómenos de adsorción o cambios de bases.

En los sistemas acuífero-río, la acción del hombre puede dar lugar a cambios en las características iniciales del agua de los pozos. Si el bombeo es intenso, tanto los componentes químicos como la temperatura de las aguas del pozo, serán cada vez más similares a las del río.

En las fosas tectónicas es frecuente que las aguas subterráneas más profundas sean salinas. La salinidad se debe

principalmente a la existencia de aguas congénitas, marinas o de cuencas desérticas, o bien a la disolución de las rocas evaporitas que pueden existir dentro de los propios acuíferos o en las capas semiconfinantes que las separan.

El agua de las dunas, especialmente si son arenas silíceas, tienen una composición química casi igual a la de infiltración de agua de lluvia. En las llanuras costeras, se tendrá una interfase agua dulce-agua salada.

### III.2.2 Rocas plutónicas y metamórficas

En su conjunto, ambos tipos de rocas son muy impermeables y tienen una capacidad muy reducida como embalses subterráneos.

La importancia del tipo litológico de la roca en la permeabilidad y en la porosidad, no suelen ser tan grandes como quizás se podría esperar. Puede decirse que, todas las rocas densas (metamórficas y cristalinas) tienen propiedades hidrogeológicas bastante análogas. Las diferencias que se aprecian entre los distintos tipos de rocas, parecen deberse principalmente a diferencias en su historia de meteorización y/o fracturación, es por eso que desde el punto de vista hidrogeológico es mucho más importante la influencia de la meteorización y/o fracturación, que las dimensiones de la formación geológica.

La meteorización y la fracturación radica por lo regular, en un aumento en la porosidad y permeabilidad, pero la meteorización puede dar lugar a una reducción de la permeabilidad, con productos arcillosos.

## Calidad del agua

No existe una relación biunívoca entre las características y la composición química de las aguas de una zona, ya que esta tiene influencia, no sólo por el ambiente geológico (composición química de las rocas y sus productos de meteorización), sino por el ambiente hidrológico (precipitación, evaporación, transpiración y permeabilidad de los terrenos).

Los principales constituyentes químicos de los materiales que forman las rocas ígneas y metamórficas, son óxido de sílice, aluminio, fierro, calcio, sodio, magnesio, potasio y otros materiales insolubles, los solubles serán transportados por el agua.

### III.2.3 Rocas volcánicas

Las clasificaciones elementales o de campo se basan en la textura de las rocas, en su color y en su composición mineralógica.

Una importante característica geohidrológica de las formaciones volcánicas, es la frecuente presencia de barreras impermeables o poco permeables con disposición bien sea casi paralela al buzamiento de las coladas, o bien casi vertical al buzamiento. Estas barreras pueden dar origen a una cierta compartición de una misma formación geológica en un conjunto de unidades geohidrológicas más o menos aisladas.

### Porosidad

La porosidad de las rocas volcánicas varía mucho según su origen. En las zonas en las que la solidificación ha sido tranquila, como las chimeneas, lagos de lava, donde la porosidad es casi siempre inferior al 5%.

Estos mismos materiales, cuando escurren sobre la superficie en forma de coladas, o dan lugar a piroclastos, suelen presentar una porosidad muy superior y que en conjunto puede ser desde un 10 a un 50%.

#### Permeabilidad

Las coladas basálticas tienen mayor permeabilidad que las ácidas y las modernas son más permeables que las antiguas. La permeabilidad de las formaciones volcánicas, en su conjunto es casi siempre anisótropa. Cuando hay diques la permeabilidad máxima suele ser en la dirección del movimiento de la lava y la mínima, en la dirección perpendicular a la colada.

La edad de los materiales juega un importante papel en la permeabilidad, así como la historia de los esfuerzos a los que han estado sometidos. Cuando más antiguos y profundos menos permeables serán.

#### Calidad del agua

La calidad del agua subterránea, suele ser excelente; del tipo calcio-magnésico-bicarbonatada, en los basaltos o rocas básicos; y de tipo sódico-cálcico-bicarbonatada, en las rocas volcánicas de tipo ácido.

### III.2.4 Rocas sedimentarias consolidadas

Los acuíferos de las rocas sedimentarias consolidadas están menos explotados que de los materiales sedimentarios no consolidados, debido probablemente a la menor seguridad de obtener el caudal buscado.

### Clasificación.

|                        | <u>Tamaño de Partícula.</u>                         |
|------------------------|---|
| Detritico:             | 1. Conglomerados y Calizas detriticas mayor de 2 mm |
|                        | 2. Areniscas de 2 a 0.06 mm                         |
|                        | 3. Arcillas menor de 0.06 mm                        |
| Precipitación Química. | Inorgánicas → Calizas, Margas                       |
|                        | Orgánicas → Carbón, Calizas orgánicas.              |

La primitiva disposición de los estratos, prácticamente horizontales, pueden quedar considerablemente modificados por los procesos orogénicos, con la consecuente formación de pliegues y fallas, y en algunos casos cabalgaduras y corrimientos.

### Porosidad.

Rocas detriticas de grano fino.

La porosidad total es función del ámbito sedimentario original y de los procesos posteriores. Si las lutitas no han sido cubiertas por fuertes espesores de sedimentos, pueden tener porosidades comprendidas entre 10% y 25%, pero si han sido fuertemente compactadas por las rocas suprayacentes, y además han sido cementadas en mayor o menor proporción la porosidad puede descender a un 2% o más bajo. Un aspecto importante de considerar, es su capacidad como roca almacén a acuitardo, aunque no son acuíferos.

## **Areniscas y conglomerados.**

La porosidad depende, en primer lugar de los mismos factores que la porosidad y de los mismos materiales sueltos que formaron el depósito inicial, es decir, de la composición granulométrica, de la forma de las partículas, de su redondez y de su empaquetamiento u ordenación. La porosidad puede disminuir si los huecos son rellenados de calcita, sílice o minerales arcillosos.

## **Permeabilidad**

### **Rocas de grano fino**

Desde el punto de vista de la hidrología subterránea, estos materiales fueron considerados clásicamente como confinantes o impermeables.

### **Areniscas y conglomerados.**

La permeabilidad depende no sólo del tamaño de los poros o intersticios, sino también, de que estos poros no hayan quedado incomunicados entre sí debido al proceso de cementación.

### **Calidad del agua**

Las aguas subterráneas de las pizarras suelen tener un contenido mayor en hierro y flúor con un pH ligeramente ácido.

Las procedentes de las rocas carbonatadas son ligeramente básicas y predominan en ellas los iones de bicarbonato, cloruro y magnesio. El agua de las areniscas puede ser muy variada, de acuerdo con la diferente composición de estas rocas y con su capacidad de cambio de bases que, a veces, es importante.

### III.3 PROSPECCION GEOFISICA

La prospección Geofísica es una rama reciente de la Geofísica aplicada, desarrollada por cuantos dedican su actividad al estudio y reconocimiento del terreno con fines más o menos prácticos.

Se define como la ciencia y técnica que, a partir de fenómenos físicos, naturales o provocados, trata de conocer la distribución de los materiales en el subsuelo y sus propiedades.

Para el estudio del subsuelo, relacionado con los acuíferos que es lo que interesa en esta tesis, se tratará de analizar los métodos eléctricos.

Los métodos eléctricos utilizan la medición de ciertas magnitudes de campo eléctrico o electromagnético, para investigar las características de estructuras, depósitos minerales o condiciones del subsuelo. Utiliza la energía de los campos potenciales y pueden medir las influencias de campos naturales de la tierra o de campos generados artificialmente. Como los campos naturales se encuentran sujetos a una gran cantidad de influencias que los hacen variar, por lo que se utilizan campos producidos artificialmente, con características conocidas.

La conducción eléctrica de las corrientes eléctricas asociados a los campos terrestres depende de la estructura de las rocas sólidas profundas y del contenido de agua salina presente en los poros de las rocas.

#### III.3.1 Métodos eléctricos

Los métodos eléctricos se basan en propiedades eléctricas.

- 1 Resistividad o inversa de la conductividad.
- 2 Constante dieléctrica.

- 3 Actividad electroquímica, debida a los electrolitos contenidos en el terreno.
- 4 La susceptibilidad magnética.

#### Coceptos físicos fundamentales

- 1 Flujo de corriente.
- 2 Refracción de las líneas de corriente.
- 3 Actividad electroquímica.
- 4 Propiedades electromagnéticas.
- 5 Permitividad.
- 4 Permeabilidad magnética.

#### Medición de potenciales naturales

A veces en el terreno se producen fenómenos electrocinéticos y electroquímicos, en forma natural y espontánea, que originan corrientes eléctricas locales.

Los fenómenos electrocinéticos se relacionan con el movimiento del agua de lluvia por electrofiltración, y con la circulación de fluidos en los acuíferos.

Los fenómenos electroquímicos pueden generarse de 2 maneras:

- 1 Por la presencia de un campo eléctrico producido por actividad electroquímica, cuando algunos minerales sulfurosos se encuentran parcialmente cubiertos por líquidos, generalmente bajo el nivel hidrostático.

- 2 Cuando dos formaciones se encuentran en contacto y que tienen distintas concentraciones salinas en solución, puede originarse una polarización espontánea de origen electroquímico.

## Proceso básico de funcionamiento

Se colocan dos electrodos en contacto con el terreno y se conecta a un voltímetro, se detectarán corrientes eléctricas con voltajes que varían en un rango entre algunos milivolts y decenas de estos.

Equipo necesario de medición.

Se requieren dos electrodos no polarizados, cables de conexión y un voltímetro con capacidad de medir milivolts. Se humedece el terreno con una solución de sulfato de cobre, esto es para asegurar un buen contacto de los electrodos con el terreno.

Pueden utilizarse dos sistemas, con separación fija de los electrodos y con separación variable. No son muy precisos, pero su económica operación permite utilizarlos fácilmente, y en ocasiones se emplean como un método auxiliar.

### III.3.2 Métodos de resistividad

En terrenos que no son isotrópicos o que los cuerpos que se encuentran en el subsuelo tienen resistividad diferente al medio cajonante, para obtener información sobre la resistividad, es necesario utilizar electrodos distintos para introducir la corriente en el terreno, y medir la diferencia de potencial existente entre dos electrodos adicionales, con lo que se mide el gradiente de potencial en la superficie, asociado a una corriente que circula por el subsuelo.

El valor de resistividad que se obtiene cuando existen varias capas de propiedades eléctricas distintas es sólo aparente.

La resistividad aparente depende de:

- a) Las características eléctricas de las capas.
- b) El coeficiente K de la disposición de los electrodos.

Para medir la resistividad existen diferentes arreglos, esto es por que presentan diferentes ventajas de sensibilidad, operacionales y/o de cálculo. Los cuales son:

- a) Método de Wenner.
- b) Método de Lee.
- c) Método de Schlumberger.
- d) Método continuo, (electrodo móvil).

Procedimiento de campo para determinar la Resistividad:

Son variados, dependen del equipo, de la distribución de electrodos y se dividen en dos técnicas.

- 1 Medición de resistividad a profundidad constante (calicatas eléctricas).
- 2 Medición de la resistividad a diferentes profundidades en un mismo punto (sondeo eléctrico vertical).

Calicatas eléctricas.

Consiste en hacer mediciones a lo largo de una línea, con un dispositivo cuadripolo de longitud constante, que depende de la profundidad de sondeo y del tipo de distribución que se haya elegido; la técnica permite la variación de la resistividad aparente, en diferentes puntos, para una profundidad teórica de investigación.

### Sondeos eléctricos verticales.

Para efectuar un S.E.V. en un punto determinado, se irá aumentando la separación entre electrodos, con lo que aumentará la penetración de corriente y por lo tanto la profundidad de medición. Teóricamente no existe límite en la profundidad por investigar, pero en la práctica, la magnitud de la energía eléctrica que hay que inyectar y las longitudes de las distribuciones de electrodo, restringen la aplicación de los S.E.V.

### Polarización inducida

Al introducir corriente eléctrica al subsuelo, en los electrodos de medida del potencial aparece el voltaje en forma creciente y rápida hasta que se estabiliza, y la que al cesar la excitación externa el voltaje no decaé instantáneamente a cero, sino que lo hace con tendencia exponencial a cierto tiempo; si la excitación fué prolongada se le conoce como P.I. (polarización inducida).

La corriente en el subsuelo es generada por el movimiento de los iones en los electrolitos, presentes en los poros de la roca, y que la existencia de algunas cargas eléctricas originadas por depósitos de otros materiales, crean voltajes que se oponen al flujo de corrientes eléctricas, con lo que se tiene una polarización. La P.I. es de origen fundamentalmente electroquímico, depende más de la polarización espontánea que de la resistividad del material del subsuelo.

### III.3.3 Métodos electromagnéticos

Se basa en el flujo de corriente alterna de una bobina o cable conductor, se produce un campo electromagnético alternante, que si se propaga a través del suelo induce corriente eléctrica en cualquier conductor que se encuentre en su trayectoria. Las corrientes inducidas secundarias fluyen de tal manera, que su

campo electromagnético asociado se opone al campo inducido. La intensidad de la corriente inducida depende de la resistividad eléctrica del material conductor que esté presente, y de la frecuencia alternante del campo primario que está induciendo.

#### III.3.4 Método magnetoteléurico

Se basa en la variación del campo magnético terrestre que inducen corrientes eléctricas variables que circulan en el subsuelo, las que se conocen como corrientes telúricas. Se han podido identificar variaciones del campo magnético que se relacionan con variaciones en las corrientes telúricas que se consideran de tipo electromagnético.

#### III.4 FORMAS DEL SISTEMA

Generalmente el conocimiento geométrico e hidráulico de un sistema acuifero que se modela no es exacto. Dado que como se ha visto hasta ahora en la determinación de ciertas características petrofísicas se cometen errores por diversas causas.

Se debe mencionar también que, en base a esos datos aún poco confiables, se tendrá ya una idea y se formulará una hipótesis que a través del tiempo se irá corrigiendo y mejorando hasta ajustar el modelo al que ocurre en la realidad.

La definición y conocimiento de la geometría del sistema, puede comprender los siguientes aspectos:

- 1 Cota de la base y cima de cada una de las formaciones consideradas. Se obtienen a partir de los datos de los sondeos existentes, como registros de tipo litológico y de la cartografía geológica e hidrogeológica de detalle con apoyo de la geofísica ya mencionada.

2 Limite de cada una de las formaciones. Se obtiene a partir de la cartografía geológica y de los datos de sondeos con apoyo de la geofísica.

3 Límites del sistema, sean físicos (barreras impermeables) como falla, discordancia, disminución de la saturación de agua, porosidad, permeabilidad o por efectos combinados; o hidráulicos (rio, lago o mar conectado al acuífero, divisoria de aguas subterráneas, etc.). Se obtienen de los datos cartográficos, geológicos y de sondeos, por un lado; y de la observación de las superficies piezométricas, resultados de ensayos de bombeo e hidrogramas de los pozos.

Obtención de los datos geométricos.

La forma más usual de presentar los datos geométricos es mediante planos en los que se represente mediante curvas de nivel cada una de las superficies límites (isohipsas), tomando como referencia un plano horizontal cualesquiera, o en caso de acuíferos costeros, el nivel medio del mar. Uno de estos planos debe ser la propia superficie topográfica, con indicaciones suficientes como para poder obtener la cota del agua de los ríos, lagos y canales existentes. Dichos planos deben contener los límites de cada uno de los acuíferos y acuitardos considerados.

En regiones costeras conviene disponer de la base topográfica del fondo marino, como orientación para informar correctamente sobre la estructura de los acuíferos y condición de limitantes, conviene también incluir un cierto número de perfiles representativos, en los que, a veces conviene exagerar la escala vertical a fin de resaltar detalles que de otro modo no se podrían dibujar o distinguir.

En lugares con abundantes pozos y sondeos, la geometría puede quedar definida con base en los datos históricos o al

inventario y un mínimo de conocimientos de campo, en especial si la génesis y modificaciones sufridas por los materiales es bien conocida. No obstante es probable que convenga realizar algunos sondeos confirmatorios, de complemento, o para reconocer los niveles más profundos, para los cuales la información es a veces insuficiente o imprecisa; ello es especialmente cierto cuando la mayoría de los pozos no llegan a la base del acuífero.

Principalmente la síntesis de la cartografía de las aguas subterráneas (mapa piezométrico, de resistividades, temperaturas, hidroquímicas) está acompañada de prospección geológica y geofísica.

El inventario de los recursos hidrológicos es lo que permite determinar y reconocer los datos de base sobre las características hidrogeológicas y los factores de flujo de las aguas subterráneas.

A continuación se menciona como se haría un inventario de datos para tener una base y poder completar más aún la configuración del sistema acuífero a fin de definir de una manera más aceptable la geometría del acuífero que es lo que interesa por ahora.

Obtención de los inventarios hidrogeológicos.

Esta obtención se basa principalmente en tres principios básicos generales:

- 1 Búsqueda y clasificación metódica del conjunto de datos hidrogeológicos concernientes a las aguas superficiales y subterráneas.

- 2 Prospección y estudio sistemático de todos los puntos de agua, estaciones de medida, obras de captación, etc.

3 Precisión máxima de la totalidad de los datos de base reunidos.

Para la ejecución del inventario se recomienda hacerlo también en tres etapas:

1. Documentación en archivos y fichas provisionales.
2. Prospección sobre el terreno.
3. Realización de los documentos definitivos.

Una prospección sobre el terreno involucra:

- La verificación de la documentación obtenida.
- El estudio sistemático de todos los puntos de agua (naturales y artificiales).
- El estudio geológico y geomorfológico.

Una realización de los documentos definitivos.

- Principios generales.
- Identificación de los puntos de agua.
- Normalización de los documentos.
- Colocación de los soportes transparentes.

Hasta lo aquí expuesto se pueden tener herramientas para conformar ya una geometría del sistema. Es claro que se debe correlacionar todos los valores y datos obtenidos y no caer en el error de conformarse con un sólo valor, ya que si se considera todo el conjunto de datos, el problema será más exacto o al menos esos datos serán representativos de lo que se quiere modelar.

Con las exploraciones directas, indirectas y otros datos tomados de la historia de producción de los pozos; se tiene una base firme y un argumento bien definido para establecer un modelo geomorfológico en base a los factores antes analizados.

# *CAPITULO IV*

## *CONCEPTUALIZACION*

La conceptualización es un tema que se tratará de analizar en el presente capítulo. En él se tratará de comprender como funciona un acuífero tanto en una cuenca cerrada como en una cuenca abierta.

La conceptualización no es más que el establecimiento de un modelo conceptual, es decir, ese modelo está representado principalmente por varias características, o argumentos las cuales se estudiarán más adelante.

Los datos que se deben de conocer para establecer el modelo representativo de un sistema de aguas subterráneas son:

- a Geología.
- b Características químicas de las aguas subterráneas (contenido iónico).
- c Datos que corresponden a la discretización del sistema.
- d Datos que describen las interacciones de las componentes hidrológica y climatológica sobre el subsistema físico.
- e Los que describen las interacciones de los desarrollos socioeconómicos sobre el subsistema físico.

a. Geología. La geología estructural es determinante en la búsqueda y definición del agua subterránea, el patrón estructural del área juega un papel importante en el estudio y está directamente relacionado con los escurrimientos superficiales y sobre todo del subsuelo, interponiéndose en primer lugar las fallas, las fracturas y la erosión a través del tiempo geológico, así como la depositación de materiales no consolidados, a partir de efectos tectónicos en diferentes épocas geológicas.

Para llegar a determinar la situación hidrogeológica no queda exenta la geología histórica, que define la ocurrencia de los diversos tiempos que cambiaron los esquemas geomorfológicos en períodos sucesivos.

La aplicación de registros geofísicos, para conformar por medio de las resistividades, los horizontes de roca, su situación en el subsuelo, y de esta forma relacionarlos con las investigaciones estructurales y litológicas, configurando los perfiles geoelectricos, y determinar áreas que presenten características propias de las rocas saturadas.

La conjugación de los factores antes descritos, da un criterio sobre la situación geológica, para diferenciar hidrogeológicamente las rocas permeables e impermeables.

#### Geología superficial.

El levantamiento de la geología superficial en la zona, se puede basar en la interpretación de fotografías aéreas, o por el reconocimiento general del área a observación directa. En estas se deben señalar las características del drenaje superficial, vegetación, forma y tamaño de los objetos, textura y tono de los mismos. Se deben diferenciar las unidades litológicas señalando sus características petrográficas, estatigráficas y estructurales, sus propiedades geohidrológicas, las interdependencias existentes entre ellas y su funcionamiento.

b. Para estudiar las características de las aguas subterráneas se puede auxiliar de la geoquímica.

La geoquímica aplicada al estudio del agua es un auxiliar de gran importancia en geohidrología, ya que proporciona entre otras cosas, los sentidos y direcciones que sigue el flujo subterráneo al circular por el subsuelo.

Es evidente que el agua subterránea al circular por las formaciones geológicas del subsuelo, disuelve la parte soluble de los mismos y, por consiguiente, el flujo subterráneo contendrá más sales disueltas conforme el agua avance en su recorrido.

Como se puede cuantificar perfectamente la cantidad de sales disueltas por el agua, se puede saber entonces rápidamente el trayecto que lleva el agua y también en ocasiones, el material geológico del cual provino la sal soluble.

Por ejemplo, a continuación se tienen el origen y las propiedades geoquímicas en las aguas subterráneas.

Cloro (Cl). Este ión proviene de las aguas meteóricas, de algunos minerales en las rocas ígneas (oxicloruros) y de las evaporitas. También identifica la presencia de agua de mar.

Sulfatos (SO<sub>4</sub>). Este ión procede de la oxidación de sulfuros, provenientes a su vez de la mineralización en condiciones alcalinas hidrotermales, y de la disolución del yeso y anhídrita.

Bicarbonatos (HCO<sub>3</sub>). Son los iones que comunican una mayor alcalinidad a las aguas, procede de la disolución de las calizas y dolomías e hidrólisis de los silicatos.

Sodio (Na). El mayor contenido de este ión proviene de la descomposición de los feldespatos y otros silicatos (arcillas) de sales evaporíticas, cambios de bases con arcillas del mismo origen y del agua meteórica; tiene solubilidad elevada, y difícilmente precipita.

Potasio (K). Procede de la descomposición de los silicatos en las arcillas y rocas ígneas, disolución de sales potásicas (evaporitas), concentración de aguas meteóricas, y de la contaminación residual mineral; tiene solubilidad elevada, precipita difícilmente.

Calcio (Ca). Procede de la disolución de las calizas, dolomías, yesos y anhidritas, descomposición de los feldespatos y otros silicatos (grupo de las arcillas), la dureza del agua se debe a este ión.

Magnesio (Mg). Procede de la disolución de las dolomías y calizas dolomitizadas en la descomposición de los silicatos magnésicos y ferromagnésicos de las rocas evaporíticas, es más soluble que el calcio.

Análisis y calidad del agua subterránea.

En el análisis químico del agua subterránea se deben seguir las normas elaboradas para estos fines, como lo indican los Métodos analíticos para estudios geoquímicos, ya que existen varios elementos geoquímicamente importantes, como el Boro, por ejemplo, que por lo general no se determina en otro tipo de análisis de agua.

Por ejemplo, los tres elementos nitrogenados, nitritos, nitratos y amonio, si sobrepasan la norma en muestras de agua, indican la existencia de acción bacteriana sobre materia orgánica, como hojas o plantas, e inclusive abonos químicos.

Si los sólidos totales sobrepasan por mucho la norma, indica que el agua proviene de un largo recorrido o que circula por materiales sumamente solubles.

Si los sulfatos sobrepasan la norma en las muestras y además sobrepasan la dureza total, indican la existencia de sulfato de calcio en la región.

Si el boro sobrepasa la norma, indica que el agua circula por material de origen volcánico.

Con la clasificación de Chase Palmer, con el tipo de agua, se puede saber si:

Es agua de lluvia de reciente infiltración.

Es agua con bastante tiempo circulando en el subsuelo.

#### DIAGRAMA SEMILOGARITMICO

El diagrama semilogarítmico proporciona gráficamente el tipo de agua indicado por el análisis químico.

Este diagrama como su nombre lo indica, está construido por ordenadas de escala logarítmica, en los que se anotan los valores de las concentraciones de los elementos estudiados; en el eje de las abscisas se anotan cuales son los elementos que se estudian.

El tipo de agua resulta al unir, por medio de una línea quebrada, los valores de la concentración de los elementos anotados.

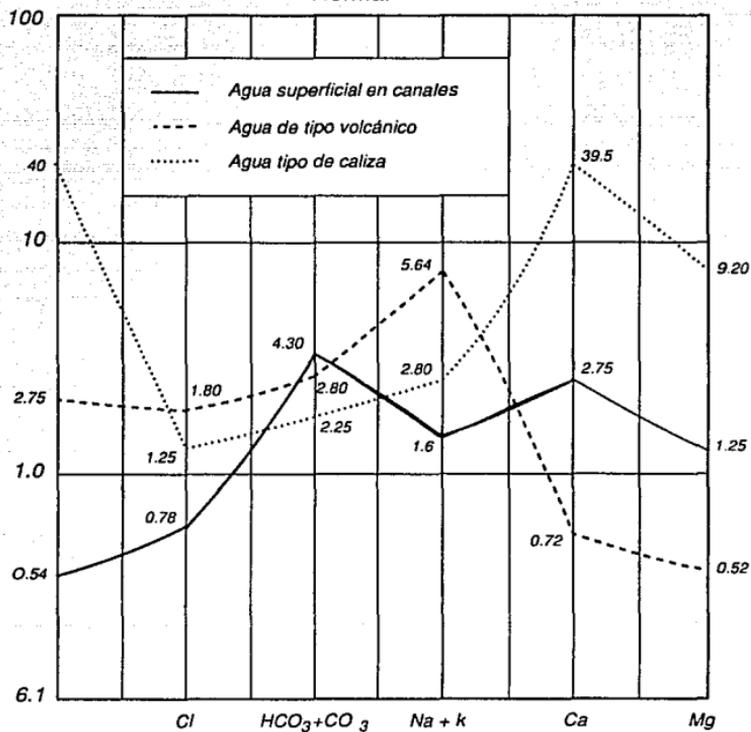
La importancia de estos diagramas se aprecia al estudiar las pendientes de la línea quebrada, pues si se comparan dos tipos de agua con diferente concentración pero con las mismas pendientes, puede asegurarse que se trata de agua de la misma familia.

#### CONFIGURACION DE LOS INDICES GEOQUIMICOS

El valor de la concentración de los índices geoquímicos determinados por el análisis, se anotan en un plano topográfico.

La configuración geoquímica se obtiene al unir por medio de una curva, los lugares que tengan igual concentración del elemento. Esta configuración de índices geoquímicos es la que muestra los sentidos y direcciones que sigue el agua en su recorrido subterráneo, ya que el flujo al circular por el subsuelo, disuelve los materiales solubles de las formaciones geológicas que atraviesa. El agua disolverá más material soluble conforme avance en el recorrido subterráneo, señalando así el sentido que sigue el flujo.

Normal



Diferentes tipos de agua, según Chase Palmer

Si el material del subsuelo fuera homogéneo, bastaría configurar un solo índice geoquímico, pero la geología muestra siempre diferentes materiales, por lo que es necesario interpretar las configuraciones de varios índices a la vez, obteniendo de ellos resultados en conjunto.

1. Cloruros: Los cloruros forman parte del grupo de los halógenos y se encuentran en diferentes concentraciones en el agua subterránea, en la que aparecen en forma de iones disociados de cloro. Este cloro proviene de dos maneras, la primera en forma de cloruro de hidrógeno junto con cloro libre, debidos a la actividad volcánica. La segunda forma se debe a la disolución de los minerales que contienen cloruros, incluyendo a las rocas ígneas; sin embargo, la mayor cantidad de cloruros que se encuentran en el agua subterránea, provienen de los materiales sedimentarios, siendo las evaporitas las más comunes.

La configuración de cloruros, proporciona el sentido y dirección del flujo que sigue el agua subterránea al disolver los cloruros que existen en las rocas; esta disolución aumentará el contenido de cloruros en el agua conforme el flujo avance en su recorrido subterráneo.

2. Sulfatos.- El azufre se encuentra en el agua subterránea combinada con el oxígeno, formando el ión sulfato. solamente en algunas ocasiones especiales, se le puede encontrar en forma de sulfuro hidrógeno. Por lo general, los sulfatos no son geológicamente los principales constituyentes de las rocas ígneas.

La mayor parte de los minerales conteniendo sulfatos se encuentran en las rocas sedimentarias, siendo las evaporitas constituidas por sulfato de calcio, ya sea en la forma de yeso o

anhidrita, las que proporcionan la mayor cantidad de ión sulfato que puede ser disuelto fácilmente por el agua subterránea. La configuración proporciona al igual que los cloruros el sentido de flujo.

3. Sólidos totales.- Por medio de la cuantificación de los sólidos totales se aprecia claramente la disolución de la materia soluble de las rocas en el agua. Este índice geoquímico determina la cantidad de sal disuelta en el agua sin precisar los elementos constituyentes de la misma, es decir, señala cualitativamente el sentido y dirección que sigue el agua subterránea al circular por los mantos del subsuelo.

4. Dureza total.- La dureza total es una característica del agua producida por elementos metálicos divalentes como el calcio y el magnesio. Esta característica del agua es muy importante en circuitos cerrados, ya que se pueden producir incrustaciones de carbonato de calcio que en ocasiones puede llegar a obstruir totalmente la tubería de un pozo productor.

c. De los datos que se necesitan para la discretización, pueden incluirse la transmisibilidad, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, y otras características propias de la roca almacén.

Pueden incluirse aquí también algunas propiedades de los terrenos, tales como la salinidad y/o sodicidad de los suelos.

Se basa en la información de campo referente a la vegetación natural, a la morfología de los perfiles abiertos, a la interpretación de los análisis físicos y químicos practicados en el muestreo de los suelos de la zona de estudio, además de los datos proporcionados por otra dependencia o gerencia, como pueden ser configuraciones freáticas por meses y para varios años, de los planos topográficos y los mosaicos aéreos, se puede delimitar

las áreas afectadas por salinidad y/o sodicidad, con esta información se harán planos indicando con diferentes símbolos el estado de los suelos según su salinidad y/o sodicidad.

d. Los datos específicos que describen las interacciones geológica y climatológica (mecanismo de recarga y descarga de los acuíferos), sobre el subsistema puede ser de dos tipos, las constantes y las que varían con el tiempo.

La variación temporal de los siguientes datos es muy baja, por lo que pueden ser considerados como constantes: El flujo subterráneo en una frontera de flujo constante; la infiltración de excedentes de riego; las infiltraciones de ríos y arroyos. Los datos que varían con el tiempo pueden incluir a: La recarga efectiva por lluvia, la recarga efectiva a lo largo de las faldas de las montañas.

e. Las interacciones de los datos socioeconómicos sobre el subsistema físico se describen mediante algunos de los siguientes datos específicos: El número total de pozos que atraviesan a cada una de las formaciones permeables, ubicación de los pozos, registro histórico del crecimiento progresivo de pozos en operación (etapas de desarrollo de las extracciones de agua subterránea) y consumo de agua subterránea; los bombeos en cada pozo (registros volumétricos y su variación temporal); la distribución espacial y temporal de los niveles estáticos observados desde el inicio de los desarrollos socioeconómicos.

Dentro de la región en estudio es necesario llevar a cabo trabajos topográficos encaminados principalmente a obtener una localización, lo más completa posible, de los alumbramientos de agua subterránea existentes, así como de acotar los pozos seleccionados para observaciones piezométricas.

En las observaciones piezométricas se obtiene información importante para analizar las condiciones del nivel freático que prevalecía en años anteriores, es decir, del comportamiento del nivel freático o nivel estático.

Como se mencionó anteriormente para tener una comprensión completa de este punto se llevan a cabo estudios económicos y topográficos, pero un estudio que también puede dar información incluso más completa es un estudio fotogeohidrológico. Este se basa en los siguientes aspectos:

1 **Localización:** Se debe localizar el área en estudio con sus límites y su extensión.

2 **Población y economía:** Deben de importarse las poblaciones que se encuentran en esta región, además de su economía que puede basarse en agricultura, industria, etc., pues es de vital importancia el agua para el buen desarrollo de la región.

3 **Clima:** El tipo de clima que impera en la región, la oscilación de temperatura en el transcurso del año, la precipitación media anual, son factores muy importantes en el estudio geohidrológico.

4 **Trabajos previos:** Deben buscarse trabajos anteriores de la región, para que sirvan de base para este estudio.

5 **Método de trabajo.**

5.1 **Fotointerpretación:** Se deben interpretar las figuras aéreas verticales a escala con los siguientes lineamientos.

5.1.1 **Tono y textura de las fotografías.** Las diferentes tonalidades de grises que aparecen en las fotografías así como el conjunto de rasgos y tamaños de los granos que componen a éstos define el tono y la textura.

5.1.2 Drenaje. El conjunto de corrientes superficiales y su densidad, sirve para determinar el grado de uniformidad de los materiales existentes, su extensión y su dirección predominante, los cambios pronunciados del drenaje se deben a los accidentes tectónicos o al diferente grado de dureza que presentan los materiales que cortan estas corrientes.

5.1.3 Erosión. El grado de dureza y consolidación de las rocas, hacen que estas adopten formas diferentes.

5.2 Traslado de los datos de la fotointerpretación a los mosaicos. La siguiente fase del estudio consiste en pasar los datos obtenidos de la fotointerpretación a los mosaicos a escala, con los cuales se elabora un plano base, que sirve posteriormente para la verificación de estos datos.

5.3 Comprobación de campo. La verificación de campo consiste en hacer diferentes recorridos a través de las principales vías de comunicación existentes en el área de estudio, se debe de buscar los afloramientos de roca en los cortes naturales tales como arroyos y ríos , así como los cortes artificiales como son los canales y drenes, para así poder verificar las diferentes unidades litológicas que afloran en esta área, se pueden hacer levantamientos topográficos del área. En los recorridos se hacen estaciones para poder tomar muestras para el estudio megascópico.

5.4 Reintegración de los datos e información final. Con los datos obtenidos en los trabajos de campo, se procede a reinterpretar las fotos aéreas y a elaborar el mapa fotogeohidrológico final a escala, posteriormente se escribe el informe final.

## 6 Fisiografía.

7 **Estratigrafía.** Deben de conocerse las unidades estratigráficas que afloran en la superficie los tipos de depósitos que se pueden encontrar en el área, para saber la litología de la región es necesario hacer pozos de exploración, los suelos son un factor que afecta el grado de infiltración del agua hacia capas inferiores, por lo cual se debe de hacer una clasificación de suelos de acuerdo con el sistema unificado de suelos.

8 **Tectónica.** Esta da el origen de la región, las principales fallas o fracturas que existen.

9 **Rocas igneas y metamórficas.**

10 **Geohidrología.**

11 **Recarga y descarga de los acuíferos.**

Es claro que para el análisis se requiere un conocimiento completo en hidrología, geología, geofísica, química, así como la experiencia de campo para lograr una representación relativamente certera en un sistema de aguas subterráneas.

Un modelo geohidrológico puede reproducir dentro de ciertos límites prácticos, el comportamiento dinámico de un sistema real de aguas subterráneas sujeto a perturbaciones por bombeos. La principal función de la conceptualización consiste en tratar de entender y describir el funcionamiento de un determinado acuífero basado en el conocimiento de las variaciones de los niveles piezométricos, de la calidad del agua subterránea en respuesta al regimen natural de recarga de los acuíferos y a las políticas socioeconómicas de explotación del recurso.

La conceptualización de un modelo geohidrológico representativo es un componente esencial en el manejo integral del recurso. Estos modelos de manejo integral permiten identificar la asignación óptima del recurso hidráulico subterráneo entre distintos usos benéficos y/o estudian la efectividad posible de las medidas propuestas para controlar los efectos adversos que puedan prevalecer en el sistema, por ejemplo, el abatimiento sistemático de los niveles estáticos, contaminación del recurso por migración de aguas de baja calidad, etc.

#### IV.1 COMO OBTENER UN ENTENDIMIENTO COMPLETO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA.

Esta actividad exige adquirir un conocimiento completo de los componentes físicos (formaciones acuíferas), hidrológico y climatológico (mecanismo natural de recarga de los acuíferos) y socioeconómico (explotación del recurso del sistema de aguas subterráneas). Ello implica la realización de las siguientes tareas:

a) *Análisis climatológicos e hidrogeológicos.*

Describir las distribuciones espacial y temporal de esas componentes (lluvia, evapotranspiración actual, escurrimiento superficial, percolación en cauces y al pie de las montañas) y sus interrelaciones en el ciclo hidrológico regional.

b) *Descripción del desarrollo socioeconómico de los recursos hidráulicos en la región.*

Describir la afectación de los asentamientos socioeconómicos sobre el ciclo hidrológico regional, especialmente, la ejercida en las aguas superficiales y subterráneas. Ello incluye la descripción histórica de las prácticas del uso del agua, de la

política de operación del recurso y de la legislación hidráulica vigente.

c) *Identificación de las características geométricas de los acuíferos.*

Realizar el mapeo geohidrológico de la profundidad, espesor y extensión de las formaciones acuíferas con base en el análisis del inventario de aprovechamientos (pozos y manantiales), en levantamientos geológicos y geofísicos, en sondeos exploratorios y en registros eléctricos.

d) *Descripción del patrón de flujo regional del agua subterránea.*

Esta definición se basa en recorridos periódicos de lecturas piezométricas y muestreos hidrogeoquímicos en sondeos, manantiales y pozos de explotación. En base a los resultados del trabajo anterior, los pozos pilotos se agrupan de acuerdo a la formación acuífera que atraviesan. Las configuraciones piezométricas y de constituyentes químicos obtenidas para cada acuífero permitirán inferir los flujos en esas formaciones. El flujo regional antes del desarrollo socioeconómico del recurso (condición inicial de equilibrio dinámico del flujo) puede ser inferido o estimado con base en los gradientes hidráulicos observados en las zonas relativamente no desarrolladas o poco afectadas por la explotación actual del recurso.

e) *Evaluación cuantitativa del flujo regional del agua subterránea.*

Los valores de los parámetros hidráulicos de las formaciones acuíferas pueden ser estimados mediante el análisis de pruebas de aforo y de bombeo. Deben refinarse esas estimaciones tomando en cuenta las pérdidas del pozo, los efectos de fronteras del flujo, la penetración parcial de los pozos, las interferencias por bombeo de otros pozos cercanos, etc. Con base en esas estimaciones refinadas de los parámetros, se pueden estimar el

flujo de agua subterránea ( $m^3$  por día), el volumen de agua almacenado y el disponible ( $m^3$ ) y el tiempo (días) de migración horizontal de aguas subterráneas de baja calidad.

#### IV.2 RELACION E INFLUENCIA QUE TIENE LA EVOLUCION GEOQUIMICA DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN LA CONCEPTUALIZACION.

La evolución de la composición química de las aguas subterráneas desde que se produce la recarga hasta el momento en que afloran en fuentes y surgencias o son extraídas con pozos. Se tiene en cuenta la influencia de rágadios y también la del mar en regiones costeras.

Se presentan los índices de más interés para el estudio de la evolución química de las aguas subterráneas en estudios prácticos y teóricos y se comentan las relaciones entre la litología y la composición del agua.

Por ejemplo, las relaciones entre los iones disueltos en el agua pueden guardar cierta relación con el terreno del que procede el agua o indicar la acción de fenómenos modificadores, o indicar una característica específica del agua considerada.

Más claramente, para la relación  $rMg/rCa$ , en las aguas subterráneas continentales varía frecuentemente entre 0.3 y 1.5; los valores próximos a 1 indican la posible influencia de terrenos dolomíticos, o con serpentina y valores superiores a 1 suelen en general estar relacionados con terrenos ricos en silicatos magnésicos como los gabros y basaltos. Sin embargo es preciso actuar con gran precaución ya que cuando se produce una precipitación de  $Co_3Ca$  en un agua aumenta la relación  $rMg/rCa$  sin que ello indique nada sobre los terrenos atravesados.

Es difícil establecer una relación directa del contenido iónico de las aguas subterráneas, porque en esa relación intervienen otros factores, que pueden ser de origen externo,

como los correspondientes a la composición iónica del agua de lluvia y a la evaporación y precipitaciones en el suelo. Para ello las relaciones establecidas han tenido un éxito limitado y su aplicación está restringida a las zonas en las que se establecieron.

Las mejores relaciones se obtienen cuando el agua subterránea se ha infiltrado a través de un suelo bien desarrollado sobre el mismo material que forma el acuífero.

Dos acuíferos litológicamente semejantes, pero en lugares diferentes pueden tener aguas semejantes o diferentes pero en general es posible encontrar algunas características comunes si se selecciona bien el método de estudio. Así por ejemplo, dos acuíferos en yesos pueden proporcionar agua muy diferente en concentración si uno está en una zona poco lluviosa y es permeable por porosidad y otro está en una zona húmeda y es permeable por fisuración, pero posiblemente podrá establecerse una semejanza en la distribución de iones, y aún podrá establecerse una relación mejor con el estudio de iones menores e iones en traza.

Si las aguas circulan por diferentes terrenos, su composición química en un punto determinado no sólo está influenciada por la litología local, sino por la litología de los terrenos atravesados anteriormente y por los fenómenos de la infiltración.

En general puede decirse que las aguas de terrenos kársticos son bicarbonatadas cálcicas o cálcicas magnésicas, las de terrenos yesosos son sulfatadas cálcicas, las de terrenos formados por granito o granito alterado son bicarbonatadas sódicas y cálcicas, las de terrenos sedimentarios de origen marino algo arcillosos son cloruradas sódicas con escaso calcio y magnesio, las de terrenos sedimentarios de origen continental algo arcillosos son bicarbonatadas cálcicas.

Como se observa, el contenido iónico de las aguas en los acuíferos, da una importante idea de cómo es que se mueve el agua en el subsuelo, el tiempo de permanencia y sobre todo de donde se cree que proceda.

#### IV.3 RELACIONES GEOLOGIA-GEOMORFOLOGIA-COMPOSICION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS.

La geología y la geomorfología de una zona condicionan la circulación del agua subterránea y la distribución de las áreas de recarga y descarga, e incluso el relieve puede condicionar de forma importante la pluviometría y cantidad de agua de recarga profunda. Todo ello conduce a la creación de sistemas de flujo locales y regionales, con líneas de corriente que difieren unas de otras notablemente en cuanto a recorrido y profundidad, y por lo tanto en tiempo de permanencia del agua en el terreno, temperatura y presión. El resultado es la posibilidad de notables variaciones en la hidrogeoquímica del agua según la zona que se considere. Ello explica que manantiales próximos en un mismo sistema acuífero puedan diferir notablemente en la composición del agua, a pesar de circular en el mismo tipo de roca; pueden existir características comunes que se pueden poner de relieve estudiando algunas relaciones iónicas características convenientemente seleccionadas en el diagrama 2.1 que aparece en la parte final del capítulo dos.

#### IV.4 RESPUESTA A ESTIMULOS QUE PRESENTA UN ACUIFERO EN UNA PRUEBA DE BOMBEO, EN LA RECARGA Y CON LA PRESENCIA DE BARRERAS IMPERMEABLES, ASI COMO LA RELACION QUE TIENE EN LA CONCEPTUALIZACION DEL FUNCIONAMIENTO DEL MISMO.

Una prueba de bombeo consiste en la extracción de una cierta cantidad de agua en un tiempo determinado, ese decir, en la medición de un caudal. Con estos datos puede calcularse la variación del descenso del nivel piezométrico para cada tiempo, también puede calcularse la transmisibilidad, tanto para acuíferos confinados como para acuíferos libres.

##### IV.1.1 Interpretación.

La interpretación de pruebas de bombeo se basa en la graficación de perfiles de descensos del nivel piezométrico contra el tiempo, o bien contra la distancia donde se encuentra el pozo, esto se hace en papel logarítmico o semilogarítmico.

Ejemplo, en la figura 4.1 se observan curvas de descensos, tiempos y perfiles de descensos.

La curva (a) representa la curva de descensos-tiempos en papel semilogarítmico para un acuífero confinado. En el tramo AC el acuífero se comporta como si fuese de gran extensión. El tramo AB representa la parte en que no es válida la aproximación de Jacob ( $u > 0.03$ ) y BC es el tramo lineal en el que los descensos siguen la aproximación de Jacob. Para tiempos superiores a los correspondientes al punto C empieza a notarse el efecto del río.

El tramo CD corresponde al período en que  $u' > 0.03$  y el DE es horizontal y representa el período estacionario en que  $u$  y  $u' < 0.03$ . En puntos alejados del pozo y próximos al río BC puede no aparecer y por lo tanto no se presentaría más tramo rectilíneo que DE. Si el bombeo es de corta duración puede no aparecer el tramo CE.

En papel doble logarítmico las curvas de descenso tienen una porción común como la que representaría de un bombeo semejante en acuífero infinito, pero a partir de cierto momento se superpone el efecto del pozo imagen obteniéndose una curva tal como la representada en la figura 4.2, que puede obtenerse por simple adición algebraica de las curvas de Theis para el pozo real y el pozo imagen.

La curva (b) representa la curva de descensos en papel semilogarítmico para un acuífero confinado.

En todo el tramo AC el acuífero se comporta como si fuese de gran extensión. El tramo AB representa la parte en que no es válida la aproximación de Jacob ( $u > 0.03$ ) y BC es el tramo lineal en que los descensos siguen la aproximación de Jacob. Para puntos superiores al correspondiente al punto C, empieza a hacerse notable el efecto del borde impermeable. El tramo CD' corresponde al periodo en que  $u' > 0.03$  y D'E' al periodo final en que  $u' < 0.03$ .

Para puntos alejados del pozo y próximos al borde, el tramo BC puede no aparecer y por lo tanto sólo será observable el tramo rectilíneo D'E'. Si el bombeo es de corta duración puede no aparecer el tramo CE'. En acuíferos confinados el efecto del borde es muy rápido pero en acuífero libre aparece después de un tiempo mucho mayor.

En papel doble logarítmico las curvas de descensos-tiempos tienen una porción común con la que resultaría de un bombeo semejante en acuífero infinito, pero a partir de cierto momento se superpone el efecto del pozo imagen, obteniéndose una curva tal como la representada en la figura 4.2.

Los perfiles de descensos están afectados por el borde impermeable y dejan de estar representados por una curva en papel semilogarítmico ( $s - \log r$ ). Se trata de curvas variables según la orientación del pérfil (figura 4.4).

Todo lo expuesto es válido para acuífero libre si los descensos son pequeños en relación con el espesor saturado del acuífero. En caso de acuífero semiconfinado, la obtención de las curvas de descensos-tiempos y los perfiles de descensos es similar pero en su forma intervienen antagónicamente el efecto de recarga distribuida y el efecto de sobredescenso provocado por el pozo imagen.

Cuando se realiza una prueba de bombeo en pozos próximos a un río, la interpretación se complica por la recarga que produce.

Las curvas de descensos-tiempos para un cierto punto de observación son las que presentan mayor utilidad. Como en los primeros momentos el acuífero se comporta como si fuese infinito, puede aprovecharse el primer tramo de la curva para determinar T y S. Conviene utilizar puntos de observación próximos al pozo a fin de tener la máxima longitud de curva no afectada por el río. Para distancias menores entre el pozo y el río los perfiles en papel semilogarítmico son casi rectilíneos y permiten deducir un valor de T similar al real, no así con S. (figura 4.3)

La interpretación de pruebas de bombeo en pozos próximos a barreras impermeables viene complicada por el efecto del pozo imagen. Respecto a las curvas de descensos-tiempos, si el punto de observación está próximo al pozo existe una primera parte de la curva en la que el pozo imagen no influye a efectos prácticos y entonces puede conocerse T y S. En puntos alejados del pozo, y especialmente en aquellos próximos a la barrera, el efecto de la barrera se puede apreciarse en los primeros puntos medibles.

Conviene utilizar puntos de observación próximos al pozo a fin de tener la máxima longitud de curva no afectada por el río.

Respecto a los perfiles de descensos, puede observarse la figura 4.4.

Es importante destacar que si en la prueba de bombeo se toman las curvas de descensos-tiempos para valores de un tramo ya afectado por la barrera, se obtiene un valor de T menor que el real.

Los efectos de barrera pueden aparecer pronto en acuíferos confinados (S pequeña) y pueden no aparecer o aparecer muy tarde en acuíferos libres (S grande).

Con todo lo que hasta aquí se ha analizado, se puede hacer ya una conceptualización de un sistema de aguas subterráneas, en este análisis no se han tocado para nada las ecuaciones matemáticas para la solución de un problema, sino únicamente se menciona la influencia que tienen y la relación que guardan los resultados con la modelación que se pretende hacer en este trabajo.

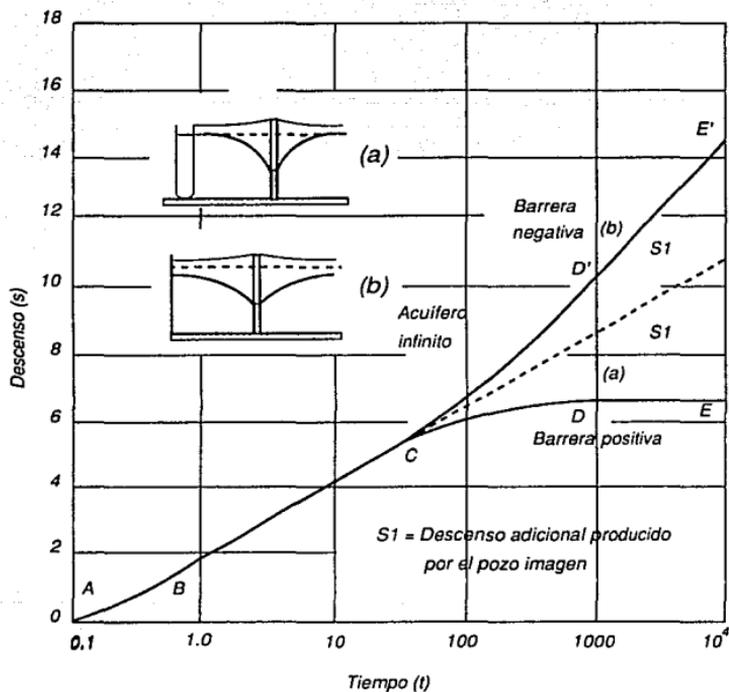
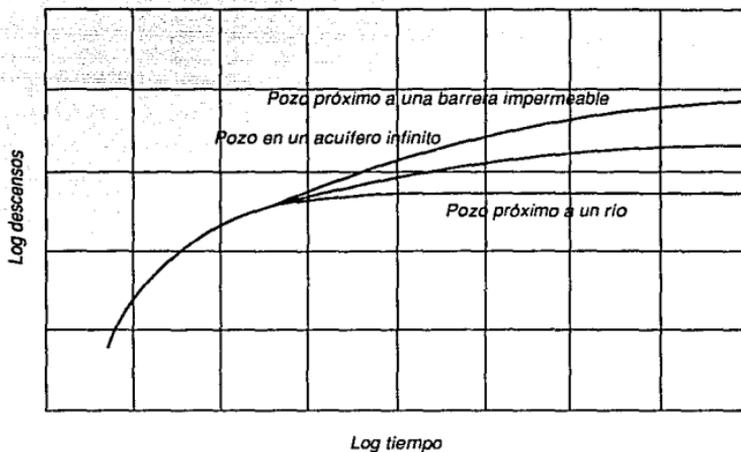
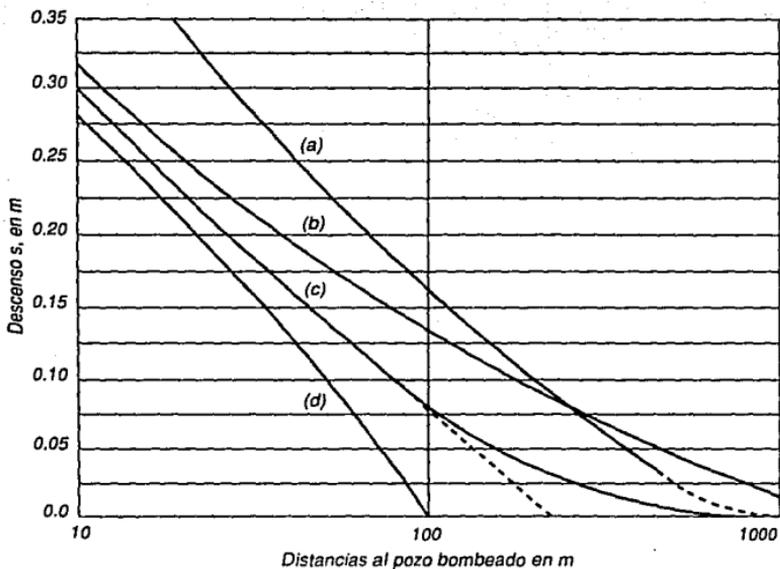


Figura 4.1. Curvas de descensos - tiempos para un pozo :  
 a) junto a un borde de recarga.  
 b) junto a una barrera impermeable.



*Figura 4.2. Efecto de la proximidad de un río o de una barrera impermeable en las curvas logarítmicas de descensos-tiempos.*



*Figura 4.3. Perfis de descensos em régimen estacionario en un bombeo próximo a un río. La situación del perfil de descensos para un acuífero infinito similar depende del tiempo transcurrido.*

- (a) Pozo en acuífero infinito.
- (b) Perfil de descensos, en sentido opuesto al río o hacia tierra.
- (c) Perfil de descensos paralelo a la línea de recarga.
- (d) Perfil de descensos hacia el río.

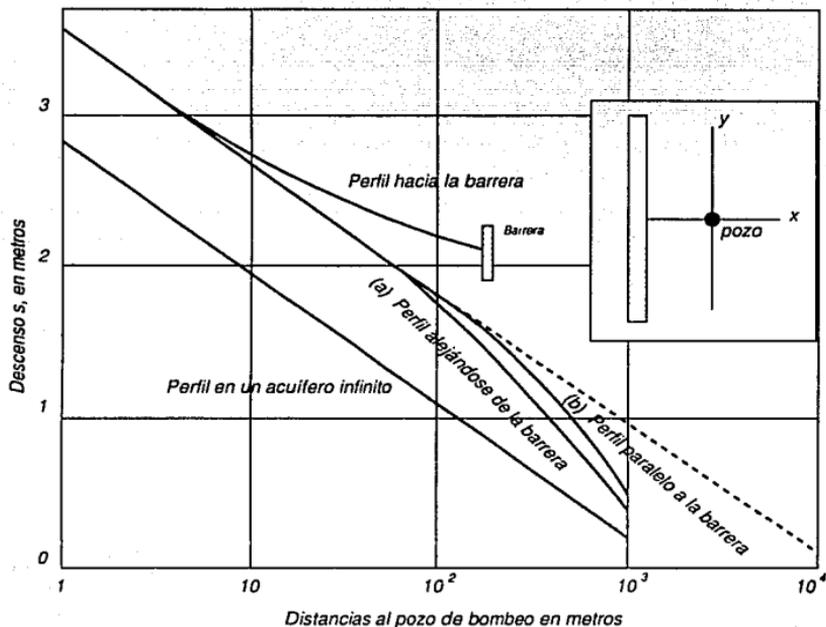


Figura 4.4. Perfiles de descensos perpendiculares y paralelos a la barrera impermeable.

# **CAPITULO V**

## **MODELOS CONCEPTUALES**

## V.1 INTRODUCCION.

La correcta utilización de las aguas subterráneas requiere que se llegue a poseer un adecuado conocimiento del flujo y niveles del agua subterránea entre diversas acciones exteriores, entre las que cabe destacar la recarga natural, las extracciones, el drenaje natural, el efecto de ciertas obras, etc.

Los modelos son una potente herramienta de trabajo que permite manejar eficazmente situaciones complejas y tratar al sistema acuífero como un todo.

## V.2 EL ACUIFERO COMO ELEMENTO DEL SISTEMA.

Un acuífero es un elemento de un sistema de recursos hidráulicos más complejo, que tiene sus leyes particulares de funcionamiento.

Un sistema comprende un conjunto de componentes físicos y geométricos, unas acciones exteriores al sistema y unas leyes de funcionamiento.

Matemáticamente, se puede en cada momento definir el sistema por una serie de parámetros y de variables.

Los parámetros pueden describir los componentes geométricos, como forma, límites, etc; o sus componentes físicos, como transmisibilidad, coeficiente de almacenamiento, etc. Las variables, que se suelen llamar variables de estado, describen la situación del sistema en cada momento y pueden ser alturas piezométricas, componentes del vector velocidad, concentración química, etcétera.

Las acciones exteriores al sistema son las que actúan sobre él y lo modifican. Pueden clasificarse como entradas o salidas (fig. 5.1).

Las acciones exteriores pueden ser controlables e incontrolables. Las primeras son las que utilizan para conseguir un objetivo y se suelen llamar variables de decisión; pueden ser bombeos, recarga artificial, drenajes, etc. Las incontrolables pueden ser determinísticas y estocásticas. Las primeras dependen del estado del sistema, por ejemplo, drenaje de un manantial, drenaje de un acuífero a un río, drenaje a través de una capa semiconfinante, etc. Las estocásticas dependen de factores hidrológicos y climatológicos, recarga natural de un acuífero, recarga de un río influyente a un acuífero, etcétera, y pueden tratarse estadísticamente.

El sistema que se considera también está sujeto a una serie de restricciones, que pueden ser físicas (por ejemplo, la altura piezométrica en un acuífero libre no puede ser superior a la altura topográfica, ni menor a la de la base del acuífero) o impuestas artificialmente (por ejemplo, puede interesar ponerlas para evitar la intrusión de aguas de peor calidad, para limitar la altura de bombeo en una zona, etc.). También pueden haber restricciones que sean debidas a criterios de planificación, por ejemplo máximos o mínimos caudales a recargar o bombear.



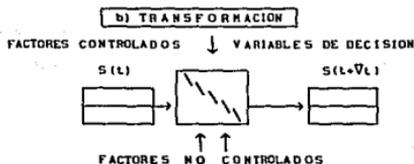


Fig. 5.1  
SISTEMAS Y TRANSFORMACION DEL MISMO  
SEGUN DEAR Y LEVIN, 1969.

Para simular el sistema, se tiene que partir de sus componentes físicos y geométricos, y de un estado inicial. Al sistema se le aplicará una serie de acciones, de las que se quiere conocer su reacción, y se obtienen como resultado las situaciones que alcanzaría el sistema en periodos sucesivos de tiempo.

### V.3 MODELO DE UN ACUIFERO.

Se entiende por modelo de un acuífero el procedimiento, analítico, matemático o analógico, que permite realizar la simulación de su comportamiento.

Un modelo es representativo del sistema real, cuando es capaz de reproducir los estados del sistema, las acciones sobre él y las leyes que lo relacionan.

Para poder definir el movimiento del agua en un acuífero se requiere de :

- a) La descripción de su geometría.
- b) La descripción de sus propiedades físicas del medio en cada punto del dominio. Permeabilidad, transmisibilidad, coeficiente de almacenamiento, etc.
- c) Las leyes que rigen el movimiento del agua (Ley de Darcy).
- d) Las condiciones en los límites del sistema.

- e) Las condiciones del sistema en un tiempo  $t=0$ .  
 f) La descripción de las acciones exteriores al sistema.

Con todo lo anterior, se tiene la ecuación diferencial que describe el movimiento del agua en un acuífero.

Para el caso de tres dimensiones:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right] + F = S_s \left[ \frac{\partial h}{\partial t} \right]$$

Para el caso de dos dimensiones:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] + F \cdot b = S \frac{\partial h}{\partial t}$$

Además se requiere de:

La descripción del dominio.

La descripción de  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$ , y  $S$  o  $T_x$ ,  $T_y$  y  $S$  en el dominio.

La descripción de  $F$ .

Las condiciones en los límites.

las condiciones iniciales.

#### V.4 CLASIFICACION DE MODELOS.

Los diferentes tipos de modelos se diferencian en la forma de resolver la ecuación diferencial y en la forma de describir el sistema.

#### V.4.1 Modelos analíticos

Dan la solución exacta de la ecuación diferencial por medio de funciones analíticas o tabuladas

El método más útil es el de las imágenes. Para aplicarlo, se requiere la existencia de un acuífero homogéneo y unos límites rectilíneos. Estos límites pueden ser impermeables o de altura piezométrica constante.

#### V.4.2 Modelos matemáticos

Utilizan métodos numéricos para resolver la ecuación diferencial.

El método más desarrollado es el de diferencias finitas, con el que se obtiene la solución de la ecuación para una serie de puntos discretos en el espacio y en el tiempo.

De acuerdo con este método, la descripción del sistema se hace en elementos celulares asignados a cada uno de los puntos del espacio.

La ecuación diferencial se aproxima por una serie de ecuaciones algebraicas en que la incógnita son las alturas piezométricas en los puntos escogidos, y las particularidades del método consisten en el planteamiento de esas ecuaciones y en la forma de solucionarlas.

#### V.4.3 Modelos analógicos

Resuelven la ecuación diferencial de una forma indirecta. Para ello, se utiliza un fenómeno físico que tenga una ecuación diferencial del mismo tipo que las de los acuíferos. Los más importantes son los que utilizan la analogía eléctrica, por ejemplo de capacidades y resistencias.

## V.5 SECUENCIA DE MODELACION

La secuencia a seguir en una modelación es el de la figura 5.2. De la situación real a través de los estudios hidrogeológicos se pasa a un modelo conceptual. De acuerdo con el objetivo y las necesidades de la simulación, se elige el método operativo.

En la figura 5.3 se expresan gráficamente los procesos que siguen en la utilización de un modelo.

Se asignan unos parámetros y unas variables al modelo, se simulan unas acciones históricas conocidas y se inspeccionan los resultados para ver si son coherentes con los datos reales que se poseen. Si no lo son, habría que modificar el modelo conceptual.

## V.6 OBJETIVOS DE LOS MODELOS DE ACUIFEROS

El caso más general de utilización de los modelos de acuíferos ha sido simular su comportamiento ante distintas alternativas de utilización de aguas subterráneas y tratar de elegir la más conveniente.

Usos de modelos de acuíferos.

1. Estudio de drenajes agrícolas.
2. Estudio de redes de filtración en presas.
3. Estudio de efectos de pantallas de inyección y drenajes en presas.
4. Predicción de la subida de niveles en acuíferos conectados con embalses, que puedan crear salinización o encharcamiento de suelos.
5. Estudio del efecto del almacenamiento en laderas o de « bank storage » en acuíferos o embalses.
6. Movimiento de contaminantes en acuíferos.

## V.7 DATOS NECESARIOS, OBTENCION Y PRESENTACION

La construcción, ajuste y utilización para un modelo de simulación de un sistema acuífero precisa de la elaboración previa de un conjunto de datos tales que permitan definir:

- a) Geometría del sistema.
- b) Características hidráulicas.
- c) Funcionamiento hidráulico.
- d) Acciones sobre el acuífero (entradas y salidas de agua).
- e) Respuesta del acuífero a las acciones, o sea a variaciones del potencial hidráulico en cada unidad.
- f) Leyes que rigen la hidrología de la región.

Los datos a) y b) definen el sistema acuífero y sirven para la construcción del modelo, junto con ciertas condiciones en los límites que se deducen de c).

Los datos c), d) y e) sirven para el ajuste y validación.

Los datos f) sirven para crear situaciones posibles a las que se somete el modelo, ya validado, a fin de averiguar su comportamiento.

Conviene hablar de un sistema acuífero ya que en un modelo se puede considerar varios acuíferos junto con los acuitardos y niveles impermeables que los encierran.

FIGURA 5.2

PROCESOS DE UNA MODELACION

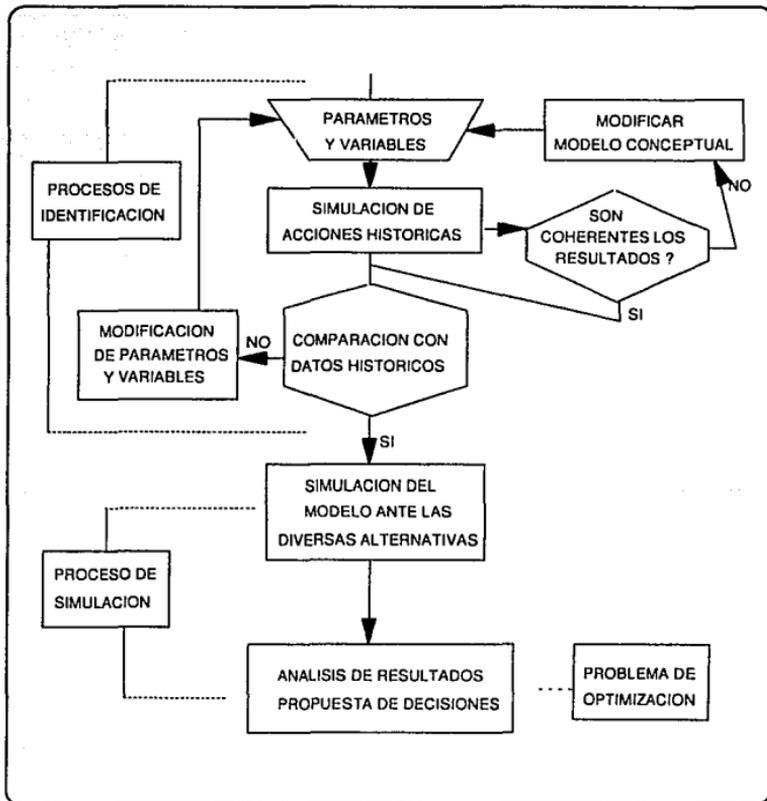
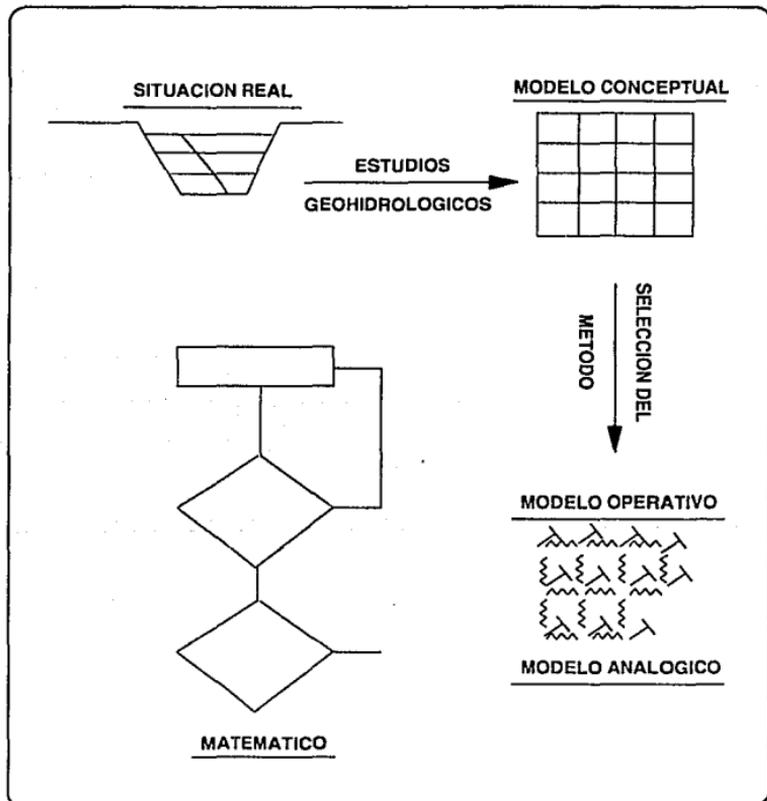


FIGURA 5.3

PROCESOS DE CALIBRACION  
Y SIMULACION



**TABLA 5.1**

**DATOS NECESARIOS PARA  
UN MODELO**

|   |   |
|---|---|
| <b>Geometría del sistema :<br/>(para construcción)</b>            | <b>Cotas de la base y del techo<br/>Situación de los límites</b>  |
| <b>Características hidráulicas<br/>(para construcción)</b>        | <b>K, permeabilidad. a veces T, transmisibilidad<br/>Kh/Kv, anisotropía<br/><math>\phi_e</math>, porosidad eficaz<br/>S, coeficiente de almacenamiento<br/>B, factor de goteo; c, resistencia hidráulica<br/>Inf; capacidad de infiltración</b> |
| <b>Funcionamiento hidráulico<br/>(para construcción y ajuste)</b> | <b>Áreas de recarga y descarga<br/>Relaciones : entre acuíferos<br/>con aguas superficiales<br/>Condiciones en los límites</b>  |
| <b>Acciones sobre el sistema<br/>(en período de ajuste)</b>       | <b>Infiltración por lluvia (1). Balances generales<br/>Pérdidas por evapotranspiración<br/>Infiltración excedente de riego<br/>Recarga : cursos de agua Q o h<br/>masas de agua Q o h<br/>puntos de agua Q o h<br/>otros acuíferos Q o h</b>    |
| <b>Respuestas a las acciones<br/>(en período de ajuste)</b>       | <b>Superficies piezométricas (1), Hidrogramas</b>   |
| <b>Leyes hidrológicas<br/>(para explotación)</b>                  | <b>Evolución bombes y recargas<br/>Evolución Infiltración lluvia<br/>Evolución infiltración excedentes de riego<br/>Evolución riegos y canales (Q, h, %/m.2, % P)<br/>Evolución masas de agua<br/>Evolución acuíferos vecinos</b>               |

**TABLA 5.2**

**MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE DATOS PARA UN MODELO**

| <b>Geometría :</b>      | <p>Sondeos</p> <p>Cartografía geológica e hidrológica (complementaria con la geofísica)</p> <p>Observación de superficies piezométricas</p> <p>Deducciones de ensayos de bombeo e hidrogramas</p>   |   |                         |  |       |                   |       |       |
|-------------------------|---|---|-------------------------|--|-------|-------------------|-------|-------|
|                         |   | <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Costo Representatividad</th> </tr> <tr> <th>Costo</th> <th>Representatividad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Caros</td> <td>Buena</td> </tr> </tbody> </table> | Costo Representatividad |  | Costo | Representatividad | Caros | Buena |
| Costo Representatividad |   |   |                         |  |       |                   |       |       |
| Costo                   | Representatividad   |   |                         |  |       |                   |       |       |
| Caros                   | Buena   |   |                         |  |       |                   |       |       |
| <b>Características:</b> |   |   |                         |  |       |                   |       |       |
| <b>hidráulicas</b>      | <p>Ensayos de bombeo (K, Kh/Kv, S, m, B)</p> <p>Ensayos de descenso (K)</p> <p>Ensayos en piezómetros (K, Kh/Kv)</p> <p>Permeámetros (K, Kh/Kv)</p> <p>Granulometría (K)</p> <p>Trazadores (m, K)</p> <p>Balances (m)</p> <p>Neutrónicos (m, humedad)</p> <p>Eficiencia a la marea. Barométrica (S)</p> <p>Métodos ambientales con tritio, radio-carbono, isótopos del H y O, análisis químicos [K, B, (m)]</p> | <p>Caros Buena</p> <p>Baratos Regular</p> <p>Baratos Regular</p> <p>Baratos Pobre</p> <p>Baratos Pobre</p> <p>Caros Buena</p> <p>Baratos Buena</p> <p>Baratos Buena</p> <p>Baratos Buena</p> <p>Baratos Regular</p> |                         |  |       |                   |       |       |
| <b>Funcionamiento :</b> | <p>Superficies piezométricas</p> <p>Hidrogramas</p> <p>Trazadores</p> <p>Métodos geohidrológicos y ambientales</p>  |   |                         |  |       |                   |       |       |
| <b>Acciones :</b>       | <p>Medidas hidrometeorológicas (cuidado con balances)</p> <p>Medidas foronómicas</p> <p>Medidas químicas</p> <p>Medidas piezométricas</p> <p>Análisis estadístico y cálculo</p>   |   |                         |  |       |                   |       |       |
| <b>Respuestas :</b>     | <p>Piezometría. (cuidado con el tipo de piezómetro)</p> <p>Aforos</p>   |   |                         |  |       |                   |       |       |

**TABLA 5.3****PRESENTACION DE LOS DATOS  
PARA UN MODELO**

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <b>Geométricos :</b>               | <b>Mapas con curvas de nivel y cortes complementarios</b>  |
| <b>Físicos :</b>                   | <b>Mapas con isolíneas (con cotas); Indicar la validez y representatividad (K, T, S, porosidad, etc)</b>   |
| <b>Acciones</b>                    | <b>Planos de aportaciones distribuidas<br/>Planos de situación de puntos<br/>Listas de extracciones en cada punto<br/>Hidrogramas complementarios<br/>(dar un dato por cada intervalo de ajuste)</b> |
| <b>Respuestas a las acciones :</b> | <b>Planos de isoplezas (uno por intervalo)<br/>Hidrogramas complementarios</b>   |
| <b>Leyes generales :</b>           | <b>Similar a los anteriores en lo que sea necesario o con fórmulas</b>   |

**NOTAS :**

- (1) En el tiempo y en el espacio  
Q = caudales; h = alturas  
% m.2 (porcentaje de caudal por metro)  
% P (porcentaje de la pluviometría)

## V.8 CUENCA HIDROLOGICA DE GUADALAJARA

La ciudad de Guadalajara, tenía antes de 1948 una deficiente dotación de agua y por ello tanto el Gobierno del Estado de Jalisco como el gobierno Federal, a través de la secretaria de Recursos Hidráulicos, se propusieron resolver el problema de la escasez buscando nuevas fuentes de abastecimiento. En un principio se hacía de fuentes dispersas, que consistían en un sistema de galerías muy superficiales entre la ciudad y la población de Zapopan y además, de varios pozos a cielo abierto y perforaciones en distintos puntos del área urbana.

Para cubrir esta deficiencia se habló intensamente de traer el agua de la laguna de Chapala, pero en aquel tiempo se consideraba el proyecto irrealizable por su elevado costo, tanto para plantas de bombeo cuanto para conducción por más de 50 Kilómetros y planta de purificación, ya que se utilizarían aguas crudas que necesitaban tratamiento para potabilizarlas. Por estas razones, la solución del problema se encontraba en las aguas subterráneas, para lo cual se hizo un estudio geológico en la cuenca local que abarca los valles de Atemajac y de Tesistán y además, en el colindante de Toluquilla al S, para estimar sus posibilidades geohidrológicas y calcular las reservas aprovechables.

La primera parte del estudio, o sea el reconocimiento geológico, indicó que localmente había recursos geohidrológicos fáciles de captar para el objetivo que se buscaba, habiéndose planeado un estudio geofísico para averiguar la estructura del subsuelo y localizar las cuencas sepultadas a fin de proyectar la mejor manera de aprovecharlas. Terminadas estas investigaciones se hicieron algunas perforaciones de prueba y posteriormente pozos de captación que aumentaron el gasto inmediatamente de los 600 litros originales a 1.150 l.p.s con la explotación de solo 8 pozos. La cuenca, como se verá después, es capaz de dar como máximo unos 4.400 l.p.s., pero como hay devoluciones de

manantiales y extracción con diversas obras, se calculó que en el subsuelo quedarían unos 1,800 l.p.s. parte de los cuales emigran fuera de la cuenca.

#### V.8.1 UBICACION

Con una extensión de 474 Kilómetros cuadrados y tributaria del río Grande de Santiago, está ubicada en la parte occidental de la Meseta Mexicana. Las coordenadas geográficas de Guadalajara (Universidad) son las siguientes; (Ortiz Santos, 1942):

|            |               |
|------------|---------------|
| Latitud N  | 20°40'26''63  |
| Longitud W | 103°21'31''66 |

Por lo que toca al conjunto de la cuenca, queda situada entre las siguientes coordenadas geográficas aproximadas y calculadas tomando como base las anteriores:

|            |                      |
|------------|----------------------|
| Latitud N  | 20°35'9 y 20°50'8    |
| Longitud W | 103°17'4 y 103°34.5' |

#### V.8.2 FISIOGRAFIA

Tiene una forma irregular, siendo más alargada de NW a SE y con una longitud máxima en esa dirección de 33.6 Kilómetros, mientras que de NE a SW su longitud máxima es de 22.4 Kilómetros.

Forma una unidad fisiográfica bien definida, limitada perimetralmente por pequeñas sierras y elevaciones discontinuas de baja elevación, cuando más de unos 250 metros sobre el nivel del valle. La mayor extensión de esta unidad fisiográfica la ocupan terrenos llanos o de poca pendiente, existiendo en el centro algunas pequeñas elevaciones, así como redes locales superficiales que han excavado cauces bien definidos para drenar este valle hacia el río Grande de Santiago o sea hacia el NE.

Existen, dos divisorias interiores definidas por parteaguas bajos y de trazo irregular; el primero separa hacia el N el Valle de Tesistán que abarca la cuenca hidrológica superficial del río Blanco y desagua directamente al cañón de río Grande de Santiago, con una extensión de 130 Kilómetros cuadrados. Al S de esta divisoria está el Valle de Atemajac, por último, hacia el W existe una curiosa depresión cerrada que forma parte de una cuenca independiente que es llamada Puerta de La Arena, pero que de todas maneras está comprendida dentro de la unidad que se viene describiendo, con una extensión de 26 Kilómetros cuadrados.

Los límites de esta unidad son los siguientes, comenzando por el W.

Después del Puerto de la Venta al W se levanta una eminencia alargada y orientada casi de S a N llamada cerro de Tepopote; continuando después más al N los Lomeríos de la Peñita, que van a unirse hacia el NW con una serie de eminencias que forman un pequeño macizo, llamadas Cerros del Colorín, La Mesa y Carnicería. Precisamente hacia el N se interrumpe este pequeño macizo para dar lugar a un puerto bastante amplio entre dicho macizo y la Sierra de San Esteban al NE, solamente interrumpido por una eminencia secundaria que es el Cerro de Copalita.

Después de la Sierra de San Esteban y también al NE, la cuenca queda limitada bruscamente por la profunda incisión del cañón del río Grande de Santiago que no se interrumpe hasta la altura de Huentitán el Alto, donde la topografía de los terrenos de la cuenca al S del cañón, se hace bastante suave existiendo un parteaguas muy bajo que la limita hacia el E y la separa de varias pequeñas cuencas, entre las que se encuentran las de los arroyos de Osorio y San Gaspar. Viene luego el puerto de Toluquilla, que comunica con el valle colindante del mismo nombre al S y después un macizo muy importante hacia el SW y W, que es el de la Sierra de La Venta, cuyo extremo sureste llamado Cerro del Colli, es el que se encuentra frente al Gachupín, mientras al

Nw este macizo termina en el Puerto de la Venta, formado entre dicho cerro y el Cerro de Tepopote.

En la vertiente oriental de la Sierra de la Venta se encuentra la cuenca cerrada Puerta de la Arena, que termina al pie de dicha Sierra en una depresión alargada de SE a NW, limitada al E por una escarpa bien definida cortada en los terrenos del relleno del valle.

El parteaguas que interiormente divide la Cuenca de Guadalajara en las dos subcuencas principales es una línea irregular y de bajo relieve, que iniciándose al W pasa por la Loma de Nextipac y continúa hacia el N frente a Santa Lucía y Tesistán, deflexionando luego hacia el E y después de dar vuelta hacia el S pasa por el cerro del Tigre. Después de un puerto, continúa por la Loma del Centinela, bifurcándose después hacia la incisión del cañón y quedando comprendida entre estas dos ramas una pequeña subcuenca independiente de la de Guadalajara.

La red de drenaje superficial, queda formada al N por la subcuenca hidrológica del llamado río Blanco, este profundiza su cauce paulatinamente hacia el E, hasta desaguar en el río Grande de Santiago al S de la sierra de San Esteban.

La otra subcuenca o sea la de Atemajac, está drenada primero por un conjunto de arroyos de poca pendiente, pero ya a la altura de las poblaciones de San Juan, Zapopan y la ciudad de Guadalajara forman un sistema dentrítico de barrancas (Ancha, Angosta, Chocolate, La Campana y Los Ocotes), con cauces profundos, tributarios o formadores del arroyo de Atemajac, después llamado río de San Juan de Dios, que poco a poco hunde su cauce hacia el E desaguardo en el cañón del río Grande de Santiago. Precisamente en esta red de barrancas se encuentra el antiguo sistema de galerías someras para el primitivo abastecimiento de la ciudad de Guadalajara.

Por lo que toca a la cuenca cerrada de Puerta de La Arena, su parte alta tiene una red superficial de fuertes pendientes que termina al pie de la Sierra de La Venta en esa Depresión.

### V.8.3 GEOLOGIA

#### Rocas

Como esta cuenca está comprendida dentro de la gran provincia Neovolcánica de México, las rocas superficiales y del subsuelo son rocas ígneas fundamentalmente extrusivas, acompañadas de material piroclásticos como cenizas finas, arenas y lapilli que forman tobas, brechas o areniscas cuando están consolidados. Existen naturalmente rellenos de materiales aluviales, que provienen de la desintegración de los materiales ígneos y además una buena parte de la superficies planas está cubierta por suelos. También hay rocas intrusivas hipabisales que forman diques encajonados en fracturas, rompiendo la continuidad de las lavas. Las rocas más antiguas de la cuenca son las andesitas y las latitas. Existe después un basamento riolítico muy extenso en el subsuelo con topografía muy complicada y en buena parte ya modelado por la erosión antes de que viniera la serie de erupciones de rocas más modernas que lo cubrieron, este basamento aflora en los Cerros del Tepopote, constituido por una riolita compacta felsofírica, de color gris claro y un tanto alterada ya y caolinizada. Las riolitas forman el macizo de los Cerros de El Colorín, La Mesa y La Carnicería, presentan cierto grado de silicificación, son de colores crema claros.

Otros afloramientos menos importantes de estas rocas aparecen en el bajo lomerío que forman el Cerro del Tigre hacia la parte central de la cuenca donde la riolita presenta una textura porfírica con grandes cristales de ortoclasa. Otra localidad es la loma del Centinela también con fenocristales de cuarzo y con esferulitas. Riolutas más modernas aparecen sobre el basamento antiguo en la barranca del río Grande de Santiago, son

las enormes masas de riolitas vitreas (Tr) que forman el macizo de la Sierra de La Venta, es un macizo formado por una serie de coladas de vidrios riolíticos sobre cuyas depresiones descansan potentes formaciones de materiales piroclásticos no consolidados, constituidos por fragmentos de pómez de diferentes tamaños.

En la Sierra de La Venta pueden distinguirse los siguientes tipos de estas rocas vitreas:

- Obsidiana
- Obsidianas con esferulitas
- Retinitas y pez
- Pómez

La pómez primaria del colli es de textura filiforme o astillosa y lustre de seda y la que ha sido transportada se encuentra en fragmentos semiredondeados que han perdido más o menos su lustre.

Con el nombre genérico de "formación Jalisco" (TJ), se ha querido designar a las grandes acumulaciones detríticas de pómez, sea en su yacimiento original o después de ser transportadas y redepositadas por el agua o por el viento en depresiones y a veces asociadas con depósitos lacustres. En la Cuenca de Guadalajara aparecen en su periferia cubriendo las vertientes de las sierras que la limitan y relleno las depresiones, pues el fondo de los valles queda cubierto por suelos. También aparece en los cortes de barrancas y arroyos.

Tobas y brechas riolíticas están asociadas con las lavas en diferentes partes de la cuenca. Existen en la región evidencias de emisiones riolíticas posteriores a las mencionadas, cuyos materiales (cuando menos piroclásticos) invadieron grandes áreas. dos de estos focos riolíticos a la vista son los volcanes de Amatitán y el de Tequila.

Los basaltos son las rocas que siguen a las riolitas en edad e importancia por las extensiones que cubren. Las emisiones basálticas han sido sucesivas desde fines del plioceno hasta ya avanzado el pleistoceno, sobre la superficie accidentada del antiguo basamento riolítico vinieron una sucesión de corrientes de basalto de erupciones que alternaban con emisiones riolíticas, principalmente representadas por gruesos bancos de tobas y brechas de erupciones paroxismales y también de coladas de riolitas vítreas como las del Colli.

Las coladas de basalto vinieron de chimeneas cercanas y dos de los más viejos aparatos responsables son los volcanes de Mexcala y Cerro de la Higuera, que no pertenecen a la cuenca, aunque desde el punto de vista geológico forman parte íntima de todo el conjunto.

Debido a la desigual sobreposición de los materiales y a movimientos de fallas, la naturaleza y la estructura del cañón cambian de un tramo a otro de modo que no puede generalizarse un perfil único si no estudiarse en cada localidad.

Los suelos ocupan la mayor parte de la superficie de la cuenca y cubren casi siempre la formación Jalisco, cuyos agregados pueden estar en su yacimiento original o haber sido arrastrados y redepositados como se indicó antes. Esta condición puede verse en muchos cortes existentes en los caminos o en préstamos para extraer los materiales arenosos de los rellenos de esta formación. Por ejemplo, en las faldas del Cerro del Gachupín, en la Ratonera, camino hacia el puerto de la Venta y en cortes del camino a Tesistán por el Puente Anaya. (Ver fig. 5.4) Pero, existe especialmente en los cortes de las barrancas donde corren afluentes del río Atemajac ya mencionados.

Por último, los aluviones modernos se ven en el fondo plano de las barrancas y arroyos, representados por limos, arenas finas y gravillas de pómez.

Habiendo hecho ya un resumen de la geología superficial se hará referencia ahora a la del subsuelo, revelada por los cortes existentes en el cañón, así como en las barrancas superficiales también en las galerías de captación; y por las perforaciones en diferentes partes de la cuenca, muy especialmente por el estudio completado con exploraciones mecánicas que cubrió la parte de la cuenca que se creyó de interés, en los lugares en que había la probabilidad de que las condiciones estructurales del subsuelo fueran favorables para la existencia de agua subterránea aprovechable.

Dicho estudio esencialmente consistió en 14 líneas sísmicas de refracción debidamente localizadas, completadas con 119 sondeos eléctricos aplicando el método de relaciones de caídas de potencial (variante de A. de la O. Carreño, 1944 y 1948). El estudio fue complementado por perforaciones con máquina. Esta investigación sirvió para localizar las obras de captación que primeramente se pensó que consistieran en galerías, aunque por consideraciones de carácter económico se resolvió perforar baterías o grupos de pozos que se irían completando a medida que se vieran los resultados obtenidos con los pozos piloto, llegándose a las siguientes conclusiones:

a) Existe una superficie basal en buena parte riolítica y también basáltica, de configuración bastante complicada sobre la que descansa parte de la serie de tobas y brechas expuestas en los cortes del cañón.

b) En las potentes capas del relleno de la cuenca la erosión estaba bastante avanzada cuando se depositaron los últimos materiales piroclásticos en espesores considerables que constituyen los acuíferos más importantes.

c) La estratigrafía del relleno es algo compleja y a medida que aumenta la profundidad, las formaciones tienen una mayor compacidad, revelada por el aumento de las velocidades de

propagación de las ondas sísmicas, que indican una serie de discontinuidades correspondientes a otros tantos estratos de velocidades y por lo tanto, geológicos. El más superficial, con potencias variables, corresponde a velocidades de propagación que van de los 370 a los 500 m.p.s.; otro estrato con velocidades de 650 a 1,000 m.p.s.; uno más de 1,650 a 1,900 m.p.s.; por último otro más de 2,000 a 2,500 m.p.s. luego la roca basal, ya sea que se trate de riolitas o basaltos y según su grado de alteración, que registra velocidades de 3,500 a 4,200 m.p.s.

Las perforaciones llevadas a cabo indican con notable precisión los límites de estas capas y muy especialmente la iniciación de la roca basal habiendo otras con diferencias que están dentro de la tolerancia que es de esperarse en este tipo de investigaciones.

#### V.8.4 TECTONICA

En la zona que interesa de esta cuenca, que el subsuelo está dividido en dos subcuencas por un alto subterráneo bastante estrecho, el cual se inicia al S hacia el puerto de Toluquilla deprimiéndose paulatinamente hasta llegar al puerto de El Refugio, después tiene dirección al NW, ensanchándose para volver abatir su relieve hacia otro puerto que casi coincide con el parteaguas superficial de río Blanco formándose una depresión. parteaguas descrito divide la cuenca subterránea en dos; la primera al W de la divisoria, que se inicia al S paralelamente a ella y se bifurca a la altura del poblado de san Juan, continuando una rama angosta hacia el NE y después hacia el NW, paralelamente al parteaguas.

La otra rama forma primero una depresión con salida subterránea hacia el Puerto de la Venta. Otra parte de la cuenca que se está describiendo se encuentra al W de san Antonio y al S de Tesistán, como una depresión bastante amplia y casi circular.

La incisión que corre a lo largo del alto subterráneo debe corresponder a una falla que va de SE a NW, marcada también en el terreno por la propia escarpa de la depresión de la Puerta de la Arena y el frente oriental acantilado del Colli.

La perforación P.E-6, de la línea sísmica, cae sobre esta falla, la perforación fué suspendida a los 250 metros en materiales de relleno, habiendose atravesado las siguientes formaciones;

- 0 a 125 metros piroclásticos y tobas
- 125 a 145 metros toba de riolita vítrea,
- 145 a 190 metros arena de riolita vítrea y
- 190 a 250 metros arcillas

El nivel del agua subterránea está a los 65 metros.

Además de esta falla, es probable la existencia de otra que corresponde a la depresión paralela al alto subterráneo y al N con dirección de NE a SW, internándose en el subsuelo de la depresión de la Puerta de la Arena.

Por último, es probable la existencia de una tercera fractura que corre de NW a SE a lo largo de la cañada comprendida entre la última rama del alto subterráneo y el otro alto secundario al W.

El macizo de la Sierra de la Venta corresponde a otro bloque en forma de caballete, comprendido entre la falla ya mencionada al borde de la depresión de la Puerta de la Arena y otras al W, que sobresale prominentemente.

La otra subcuenca que se ha venido describiendo o sea, hacia la Ciudad de Guadalajara; tiene una depresión hacia el SW de la ciudad y otra depresión más al NW de la Ciudad, de mayor amplitud a 40 metros abajo de la superficie del terreno.

Esta depresión tiene una salida subterránea hacia el Arroyo Seco, afluente al río San Juan de Dios que en partes la drena. Asimismo, la subcuenca que viene describiéndose presenta una incisión o salida subterránea hacia el Puerto de Toluquilla o sea entre los cerros de Colli y del Gachupín.

Se agregan unas palabras sobre el posible origen de la depresión de la Puerta de la Arena tantas veces mencionada. Este accidente es consecuencia del drenaje local subterráneo, gobernado y orientado por la tectónica local. (Ver el mapa al final de este capítulo).

#### V.8.5 GEOHIDROLOGIA

Condiciones de yacimiento de las aguas subterráneas. Como se sabe la importancia de una información como acuífero depende de su porosidad y de su permeabilidad, de modo que antes se hará referencia brevemente a su aspecto.

Las riolitas tanto felsíticas como vítreas, así como las latitas y andesitas, presentan microfracturas y fracturas muy cerradas que no les dan porosidad importante ni menos permeabilidad, de modo que desde el punto de vista geohidrológico se pueden considerar como impermeables, es decir, como ACUIFUGOS.

Por lo que toca a las tobas, sobre todo las del subsuelo, aunque por su constitución clástica pueden tener porosidad primaria continua, su permeabilidad es baja debido a que la masa fundamental de sus granos es fina, a veces casi arcillosa o han sufrido ya procesos diagenéticos, por lo cual se pueden considerar como ACUICIERRES.

En cambio, en la formación Jalisco, los suelos y los aluviones son buenos ACUIFEROS por que en general sus agregados son mayores, no están cementados o no han recibido procesos diagenéticos importantes. De este grupo, los mejores acuíferos

son los constituidos por dicha formación que rellena gran parte de las cuencas sepultadas que ya se describieron, alternando con lechos delgados de cenizas finas. Como a través de su masa han escurrido por largos periodos las aguas subterráneas, se produjo una alteración profunda en los agregados de lapilli de pómez, perdiendo su consistencia de tal modo, que en varios de los pozos perforados en esta formación el afloramiento perforado por la circulación del agua al ser succionada por las bombas acababa por desmenuzarse, formando cavernas en torno de las tuberías de ademe que provocaron colapsos bruscos y obturación de los filtros nulificando algunos de estos pozos que fué necesario reponer.

En la cuenca existen, como recursos hidrológicos subterráneos principales, los que provienen de la infiltración de las aguas meteóricas y serán los únicos por considerar, pues aunque existen aguas mineralizadas probablemente de origen juvenil y a altas temperaturas anormales, no tienen importancia desde el punto de vista de la Geología Económica, ya que su cantidad es insignificante.

Las aguas subterráneas no tienen presión artesiana y son aguas freáticas que forman una zona de saturación de potencia y profundidades variables.

Pero, encima de esta zona de saturación existen también acuíferos aislados de aguas colgadas que descansan sobre aguas interrumpidas impermeables e intercaladas en el gran relleno de materiales piroclásticos. Estas aguas se encuentran a diferentes profundidades que van desde los 5 a 40 metros en la subcuenca del E y de los 20 a los 75 metros en la del W.

Para calcular las reservas geohidrológicas subterráneas, se partirá de la ecuación hidrológica, aplicándola con las modalidades locales en lo tocante a las condiciones meteorológicas y geológicas. Como se sabe, esta ecuación se expresa de la siguiente forma simplificada:

$$P = S + E + I$$

Donde:

I = Infiltración, distribuida como sigue: agua colgada, agua de la zona de saturación, agua pelicular, agua retenida por combinaciones químicas, agua que emigra a otras cuencas y agua devuelta por manantiales.

P = Volumen medio precipitado en un año.

S = Escurrimiento superficial durante la época de lluvias.

E = Evaporación total.

Para los cálculos subsecuentes, se tiene la siguiente distribución de áreas en kilómetros cuadrados:

| Atemajac-Tesistán             |       | Puerta de la Arena |
|-------------------------------|-------|--------------------|
| Riolitas, Latitas, Andesitas  | 43    | 5                  |
| Basaltos                      | 11    | —                  |
| Tobas                         | 82    | —                  |
| Formación Jalisco y Aluviones | 35    | 21                 |
| Suelos                        | 216   | —                  |
| Arenas urbanas                | 61    | —                  |
|                               | <hr/> |                    |
| Sumas                         | 448   | 26                 |
| Total                         | 474   | Km <sup>2</sup>    |

Precipitación (P). Para estimar el volumen precipitado se dispone de estadísticas referentes a la Ciudad de Guadalajara, que se aplicarán a la cuenca, considerando que el poco relieve de ella no amerita ninguna corrección. El valor medio anual de la precipitación en los últimos 35 años (1921 - 1955) es de 991.5 mm como sigue:

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Enero.....      | 12.9  |
| Febrero.....    | 3.9   |
| Marzo.....      | 3.7   |
| Abril.....      | 3.2   |
| Mayo.....       | 22.4  |
| Junio.....      | 177.5 |
| Julio.....      | 251.4 |
| Agosto.....     | 198.1 |
| Septiembre..... | 155.1 |
| Octubre.....    | 46.1  |
| Noviembre.....  | 15.4  |
| Diciembre.....  | 11.8  |

Corresponden a la estación de lluvias (Junio - Octubre)  
828.2 mm.

De acuerdo con los datos anteriores y teniendo en cuenta que el área de la cuenca es de 474 km<sup>2</sup>, el volumen medio anual precipitado es:

$$P = 474 \times 0.9015 = 427.311 \text{ millones de metros cúbicos.}$$

Sin embargo, conservadoramente se pueden tomar en estas estimaciones sólo el volumen de la época de lluvias, considerando que el agua de las precipitaciones menores se pierde por evaporación y por tanto, dicho volumen será:

$$P = 474 \times 0.8282 = 392.567 \text{ millones de metros cúbicos.}$$

Escurrimiento superficial (S). Se estiman los siguientes coeficientes de escurrimiento para la época de lluvias en términos de la precipitación, considerando que en el resto de los meses las pequeñas cantidades precipitadas se pierden por evaporación:

|   |    |
|---|----|
| Puerta de La Arena .....  | 04 |
| Riolitas, Latitas, Andesitas .....  | 50 |
| Basaltos .....  | 15 |
| Arenas Urbanas .....  | 90 |
| El resto, por tener en conjunto<br>bajas pendientes y gran parte<br>buena permeabilidad ..... | 5  |

Por lo tanto, los volúmenes escurridos serán:

|                      |                       |       |
|----------------------|-----------------------|-------|
| Riolitas, etc. ....  | 43 X 0.5 X 0.8282 =   | 17.81 |
| Basaltos .....       | 11 X 0.15 X 0.8282 =  | 1.36  |
| Arenas Urbanas ..... | 61 X 0.90 X 0.8282 =  | 45.47 |
| Resto .....          | 333 X 0.05 X 0.8282 = | 13.79 |

Suma = 78.44

Donde 78.44 son millones de metros cúbicos.

Evaporación (E). Se habla de evaporación total para las diferentes clases de terrenos y formaciones calculadas, partiendo de la precipitación (P), con las ecuaciones y criterio que se siguió en la publicación sobre las Provincias Geohidrológicas de México (De la O. Carreño, 1954, pág. 306) y así se tienen los siguientes criterios:

Para las riolitas, etc., el 50% o sea la diferencia con la que escurre y en este caso, si se toma en cuenta La Puerta de la Arena, el cálculo sería:

$$48 \times 0.50 \times 0.8282 = 19.88 \text{ millones de metros cúbicos.}$$

Con igual razonamiento, para las áreas urbanas, se tendría:

$$61 \times 0.10 \times 0.8282 = 5.05 \text{ millones de metros cúbicos.}$$

Para las tobas y basaltos, 93 km<sup>2</sup>:

$$E = 0.549 P + 110.5 \text{ mm}$$

Es decir:

$$E = 565.2 \text{ mm} = 0.5652 \text{ metros.}$$

Volumen evaporado:  $0.5652 \times 93 = 52.5636$  millones de metros cúbicos.

Para la formación Jalisco y aluviones, 35 km<sup>2</sup>:

$$E = 0.189 P - 13.4 \text{ mm}$$

$$E = 143 \text{ mm} = 0.1431 \text{ metros.}$$

Volumen evaporado:  $0.1431 \times 35 = 5.00850$  millones de metros cúbicos.

Por último, para los suelos, 216 km<sup>2</sup>:

$$E = 0.516 P + 2.30 \text{ mm}$$

$$E = 429.7 \text{ mm} = 0.4297 \text{ metros.}$$

Volumen evaporado:  $0.4297 \times 216 = 92.8152$  millones de metros cúbicos.

Por lo tanto, las pérdidas totales por evaporación suman 175.3173 millones de metros cúbicos.

En los cálculos anteriores aplicando los diferentes criterios, se ha visto que las alturas de evaporación en los terrenos, van de 143 a 565 mm en la época de lluvias, según sea la naturaleza geológica de las formaciones. Naturalmente estos valores son mucho menores que las evaporaciones registradas en todo el año, en los evaporómetros "normales" del servicio metereológico mexicano en la ciudad de Guadalajara, que llegan en promedio durante el período de 1921 a 1955 a 2250.7 mm distribuídas mensualmente como sigue:

|                  |       |
|------------------|-------|
| Enero .....      | 137.6 |
| Febrero .....    | 177.1 |
| Marzo .....      | 252.3 |
| Abril .....      | 289.4 |
| Mayo .....       | 305.5 |
| Junio .....      | 217.9 |
| Julio .....      | 174.6 |
| Agosto .....     | 159.8 |
| Septiembre ..... | 144.8 |
| Octubre .....    | 142.3 |
| Noviembre .....  | 129.2 |
| Diciembre .....  | 120.2 |

Estos y los anteriores valores no son comparables pues, por ejemplo, los datos de los evaporómetros de este tipo para ser aplicados a la superficie libre del agua deben ser multiplicados por un factor de corrección de 0.66.

Infiltración (I). La infiltración es la diferencia del volumen precipitado con el escurrimiento y el evaporado, como sigue:

$$I = P - (S + E) = 392.567 - (78.4400 + 175.3173) = 138.8097$$

Esto es el volumen infiltrado que corresponde a un gasto medio de 4.4 m<sup>3</sup> p.s.

De este volumen infiltrado hay una devolución espontánea de manantiales libres y en ciénegas de 200 l.p.s., en los manantiales del Zapote y de la Escoba.

Por otro lado, afloran artificialmente los siguientes gastos: En las obras de abastecimiento, alrededor de 1200 l.p.s. como sigue:

|                                       |     |             |
|---------------------------------------|-----|-------------|
| Obras anteriores                      |     | 600 l.p.s.  |
| Subcuenca del W, 9 pozos              | 380 | 380         |
| Subcuenca del E, 5 pozos en Chapalita | 165 |             |
| Pozo de Zapopan                       | 40  |             |
| Pozo de los Górgoros (country club)   | 20  | 225         |
|                                       |     | <hr/>       |
| Suma                                  |     | 1205 l.p.s. |

Se estima, además, que en la Ciudad de Guadalajara y sus alrededores existen unos 285 pozos chinos y perforaciones que en conjunto extraen un gasto de otros 1200 l.p.s. En suma, las devoluciones del caudal subterráneo son más o menos de 2.6 m<sup>3</sup> p.s., quedando aún en el subsuelo un almacenamiento correspondiente a un gasto medio de 1.8 m<sup>3</sup> p.s., parte de los cuales deben emigrar principalmente por los puertos de la Venta y Toluquilla.

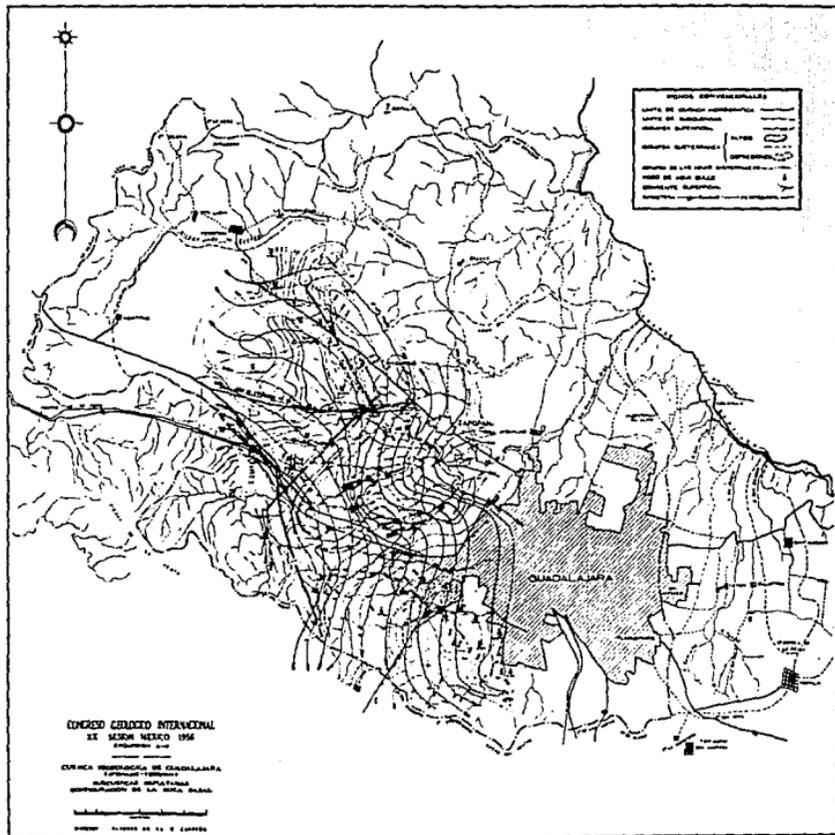
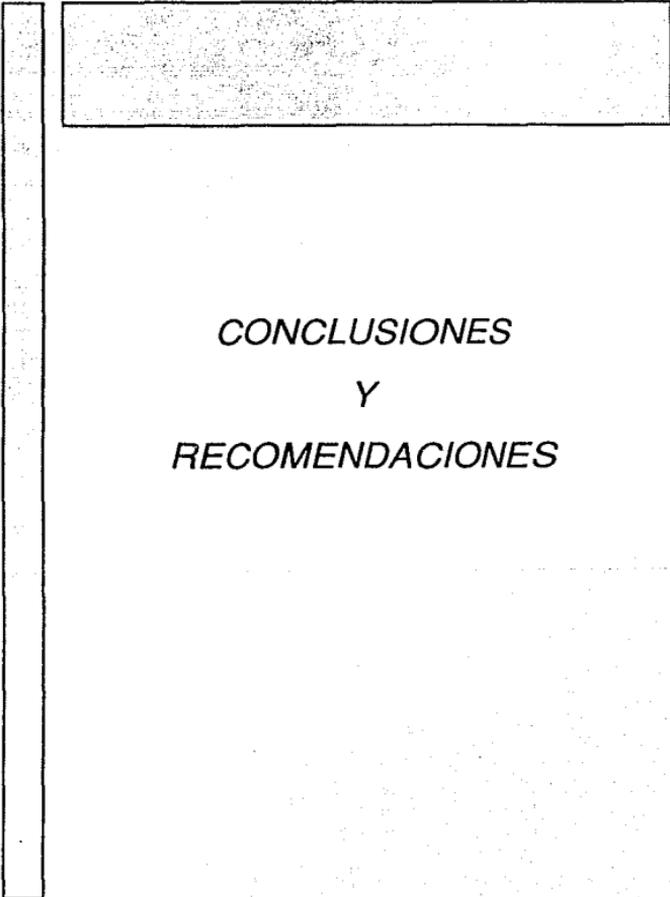


Figura No. 8



*CONCLUSIONES*  
*Y*  
*RECOMENDACIONES*

El objetivo primordial de este trabajo es establecer las bases principales para conocer físicamente a una cuenca y su funcionamiento de una manera conceptual, por lo tanto, se concluye que una cuenca cerrada y una cuenca abierta de manera general pueden tener las siguientes características :

**Cuenca cerrada.**

1. Origen. Grabens, Volcanes y Cadenas montañosas.
2. Fronteras. Tiene fronteras laterales e inferiores que pueden ser impermeables.
3. Recarga. El agente de recarga es la lluvia, que a través de la infiltración inicia el recorrido en la parte alta de la cuenca y lo sigue por los taludes o flancos de la misma.
4. Descarga. Debido al nombre que se le asigna, ésta cuenca no tiene salidas subterráneas; por lo cual las descargas son superficiales, por ejemplo, Evaporación, Manantiales, Lagos, etc.
5. Extracción. Las fuentes de descargas pueden ser por pozos y norias.
6. Ejemplos de este tipo de cuenca son:
  - Cuenca del Valle de México.
  - Cuenca cerrada de Guadalajara.

## Cuenca abierta.

1. Origen. Igneo y sedimentario.  
Por ejemplo, una Planicie ( contacto entre placa continental y marina ).
2. Fronteras. Laterales impermeables.
3. Recarga. La recarga en este tipo de cuencas es a través de la infiltración y/o drenaje.  
Es factor primordial para la recarga, la lluvia de acuerdo a la época del año.
4. Descarga. Se tiene descarga subterránea (infiltración), superficial (evaporación), y/o drenaje a otra cuenca.  
La descarga puede ser a ríos, manantiales, lagos, etc.  
Cuando la descarga es por drenaje hacia otra cuenca abierta que este comunicada, no hay equilibrio entre la recarga y la descarga, presentándose además una variación piezométrica.
5. Extracción. La fuente de descarga puede ser por pozos, norias, etc.
6. Ejemplos de este tipo de cuencas son las localizadas en :
  - La península de Yucatán.
  - Planicie costera del Golfo de México.

De manera concreta se dice que el funcionamiento de una cuenca se puede expresar con las siguientes ecuaciones :

a) Ecuación que caracteriza a una cuenca cerrada.

$$\text{Infiltración} - \text{Evaporación} = \pm \text{Variación del volumen}$$

↑  
\_\_\_\_\_ - Explotación

b) Ecuación que caracteriza a una cuenca abierta.

↓

$$\text{Infiltración} \pm \text{Descarga} - \text{Evaporación} = \pm \text{Variación del volumen}$$

↑  
\_\_\_\_\_ - Explotación

Para llegar a establecer un modelo conceptual, se debe partir de una hipótesis, subsecuentemente se elabora un estudio de la cuenca donde se recopila información; dicho estudio permite añadir o quitar los aspectos considerados en la hipótesis.

A través de este tipo de estudio se establece la conceptualización, la cual requiere de información precisa y confiable para establecer un modelo, éste verificará o en su caso anulará la hipótesis. Por lo tanto la conclusión obtenida es que la confiabilidad del modelo depende de la certidumbre de la información recopilada que representa el sistema.

Para la óptima realización de un modelo conceptual de funcionamiento de los acuíferos como elementos de un sistema en estudio, se recomienda hacer una observación detallada y llevar el control de la variación del volumen del fluido que contiene, principalmente si este es agua subterránea. La observación se debe hacer considerando la variación de los niveles piezométricos para cada acuífero en estudio.

Esta variación se presenta de acuerdo a las características físicas y geométricas del sistema, las cuales determinan que tiempo de análisis se requiera para determinar cual fue el abatimiento o el crecimiento en el nivel del fluido que contiene el acuífero.

Una buena observación permitirá conocer y determinar el funcionamiento del mismo para establecer el modelo teórico y realizar una explotación racional del fluido del acuífero. Las principales características que se recomiendan deben ser observadas y analizadas por el interesado para determinar que tiempo de análisis se requerirá y son las siguientes :

- Tipos de recarga y descarga.

La recarga y la descarga artificial pueden requerir de un tiempo de análisis menor que para las de tipo natural.

- Extensión y espesor.

El tiempo de análisis es fundamental para comparar la variación del nivel piezométrico en un acuífero donde de acuerdo a su origen de formación logró tener un espesor vertical y una extensión longitudinal muy grande, para el cual se requiere de un tiempo de análisis mayor que para un acuífero de dimensiones pequeñas.

-Epoca del año.

Se debe considerar principalmente el tiempo de lluvia, durante esta época de recarga se nota un incremento en el nivel piezométrico.

-Conocimiento del acuífero.

Para establecer el modelo de funcionamiento del acuífero, es recomendable tener bien identificado que tipo de acuífero es; puesto que no es lo mismo hacer un análisis cualitativo de un acuífugo y un acuífardo u otro donde las características difieren.

- Otra recomendación importante es conocer los estudios de prospección geofísica y elegir el método óptimo para el objetivo de explotación que se requiera. Entre los que se destacan en este trabajo son los siguientes :

1. Exploración geoelectrica.- Método resistivo, determina la interfase agua dulce - agua salada.

2. Exploración geoelectrica y sísmica.- Distingue formaciones extrusivas y sedimentarias, además la sísmica permite una buena diferenciación entre terrenos deleznablez, fisuras y rocas compactas; pueden identificar zonas de calizas fisuradas y/o lentes arenosas y rocas kásticas, entre otras.

3. Exploración magnética.- Distingue fundamentalmente rocas ígneas.

Por último una recomendación importante es la de establecer los requerimientos y usos necesarios para los cuales se destinará la explotación del agua subterránea. Esto con el fin de evitar una sobreexplotación del acuífero y por consiguiente evitar problemas de contaminación.

Si se desea tener mayor información o conocimiento sobre " Los modelos conceptuales de funcionamiento de los acuíferos ", a continuación se da la bibliografía utilizada.



*BIBLIOGRAFIA*

## B I B L I O G R A F I A

1. Rodríguez, Nieto Rafael.  
"Apuntes de Principios de Mecánica de Yacimientos"  
U.N.A.M. Fac.de Ingeniería  
División de Ciencias de la Tierra  
Depto. de Explotación del Petróleo, 1987
2. Villamar, Viguera Manuel.  
"Notas de Laboratorio de Yacimientos", 1989
3. Garalcochea, P. Francisco y Bashbush, B. José Luis.  
"Apuntes de Comportamiento de Yacimientos"  
U.N.A.M. Fac.de Ingeniería  
División de Ciencias de la Tierra  
Depto. de Explotación del Petróleo, 1987
4. Maldonado, Koerdell Manuel.  
"Congreso Geológico Internacional Excursion A - 16"  
Vigésima Sesión. México 1956
5. Espinoza, Amador Enrique.  
"Notas de Geohidrología", 1989
6. Martínez, Guerra Rúben.  
"Notas de Evaluación de las Aguas Subterráneas", 1992
7. Castany, G.  
"Prospección y Explotación de las aguas Subterráneas"  
Ediciones Omega, S.A. Barcelona, 1975
8. Castany, G.  
"Tratado práctico de las aguas Subterráneas"  
Ediciones Omega, S.A. Barcelona, 1971

9. Custodio, E. y Llamas, M.R.  
"Hidrología Subterránea"  
Tomos I y II  
Ediciones Omega, S.A. Barcelona, 1976
10. Davis, Stanley N. y De Wiest, Roger J.M.  
"Hidrogeología"  
Traducción de Martínez, Gil Francisco Javier  
Ediciones Ariel, Barcelona, 1971
11. Domenico, Patrick A.  
"Concepts and models in groundwater hydrology"  
Mc Graw - Hill, New York, 1972
12. Freeze, R.A y Cherry, J.A.  
"Groundwater"  
Prentice - Hall, Inc.  
Englewood Cliffs, N.Y., U.S.A., 1979
13. Caraveo, J. Agustín.  
"Estudio Hidrogeológico completo de los acuíferos del  
Valle de Mexicali, B.C., y Mesa de San Luis, Son."  
ACSA, Ariel Construcciones, S.A., 1968
14. Secretaría de Recursos Hidráulicos, Subsecretaría de  
Planeación General de Estudios.  
"Estudio de factibilidad técnica, económica y financiera  
para la rehabilitación, integración y ampliación del  
distrito de riego No. 5, Cd. Delicias, Chih."  
ACSA, Ariel Construcciones, S.A., 1973
15. S.A.R.H. , Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica.  
"Estudio Geohidrológico de la zona Huitzoco, Edo. de  
Guerrero".  
GEO-RE, S.A., 1986