

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 1 de 25 hojas

UNIDAD 2: CUENCAS SEDIMENTARIAS. ZONAS DE RECARGA Y DESCARGA

Ver video:

https://www.youtube.com/watch?time_continue=18&v=IFp1Eyxe8Fs&feature=emb_logo

1 Las rocas y sedimentos y sus propiedades acuíferas

Las rocas de la corteza terrestre, sus propiedades acuíferas. Distribución del agua en el subsuelo.

La corteza terrestre se renueva continuamente en un proceso cíclico en el que las rocas se forman, se transforman y desaparecen para volver a regenerarse. Todo este ciclo se desarrolla a una escala temporal muy superior a la del ser humano, por lo que estamos incapacitados para percibirlo.

Atendiendo a este concepto geológico, el ciclo de las rocas implica que todas pasan por todos sus estados (Fig. 1.1): ígneo, metamórfico y sedimentario.

- El primer estado de las rocas es formando parte del magma, el cual puede ascender a los estratos superiores por efecto de la presión, donde la temperatura es menor.
- En los estratos superiores de la corteza o en la superficie se produce el segundo estado: el enfriamiento y la formación de rocas ígneas.
- Estas rocas se transforman en sedimentos por efecto de la erosión o en rocas metamórficas, por efecto del calor y de la presión.
- Las rocas metamórficas se transforman en sedimentos por efecto de la erosión.
- Los sedimentos se transforman en rocas sedimentarias por diagénesis (compactación).
- Las rocas sedimentarias pueden transformarse de nuevo en sedimentos por efecto de la erosión o en rocas metamórficas por efecto de la presión o del calor.
- Todos los sedimentos son, en algún momento, arrastrados al fondo marino, donde acaban formando parte de la corteza oceánica. La corteza oceánica sufre un proceso de subducción y acaba transformada en magma, comenzando de nuevo el ciclo.

Un material geológico, sedimento o roca tiene propiedades acuíferas si es poroso (con capacidad de almacenar agua) y permeable (deja pasar a ésta con facilidad). El agua subterránea de los acuíferos se almacena y se mueve a través de poros, fisuras o grietas de las rocas.

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 2 de 25 hojas

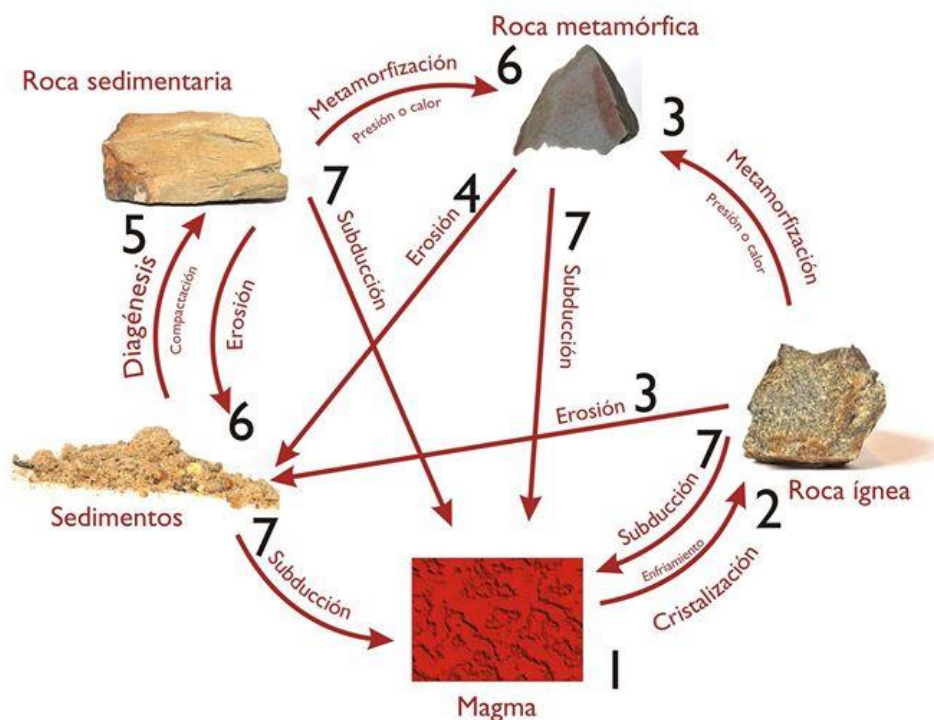


Figura 1.1: Ciclo de las rocas y procesos involucrados

La porosidad, es decir, la proporción de poros que hay en una roca, condiciona la cantidad de agua que puede almacenar un acuífero (Fig. 1.2). El agua subterránea sólo puede moverse a través de los poros que están conectados entre sí (porosidad eficaz).

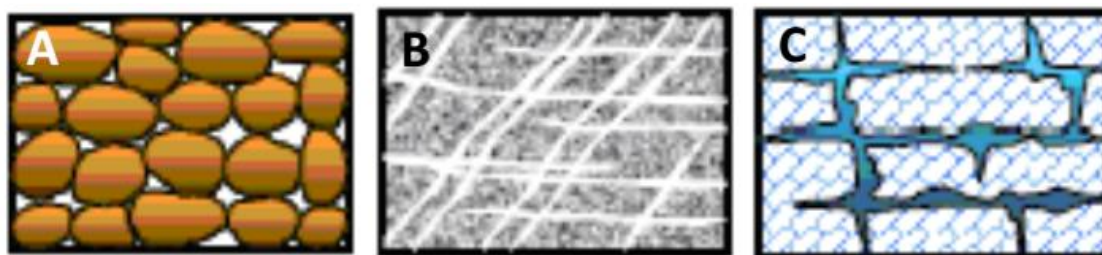


Figura 1.2: Tipos de porosidad en materiales acuíferos: intergranular (A), por fisuras (B) y por grietas o fracturas ensanchadas (C).

La porosidad, es decir, la proporción de poros que hay en una roca, condiciona la cantidad de agua que puede almacenar un acuífero. El agua subterránea sólo puede moverse a través de los poros que están conectados entre sí (porosidad eficaz). Cuando se trata de materiales sueltos, el agua ocupa y fluye por los huecos que quedan entre los granos (Fig. 1.2A). Estos sedimentos constituyen los llamados acuíferos detríticos. Otras rocas, como las dolomías y calizas, presentan una porosidad intergranular por lo general baja o muy baja. Sin embargo, son materiales que pueden llegar a mostrar propiedades acuíferas muy favorables, debido a la red de

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 3 de 25 hojas

fisuras o grietas interconectadas entre sí que existe en el interior de los macizos rocosos (Fig. 1-2B). Además, la disolución o karstificación de los minerales que constituyen las rocas calizas y dolomías ensancha las fracturas hasta dar lugar a conductos y cuevas (Fig. 1.2C). En este contexto es en el que se forman los acuíferos denominados kársticos

En el subsuelo se pueden encontrar dos grandes zonas. La zona no saturada o aireada y la zona saturada (Fig. 1.3).

❖ Zona no saturada:

Es la zona aireada, los poros se encuentran rellenos de aire y algunos de agua. El agua en esta zona se encuentra adherida al terreno por fuerzas de adsorción, fuerzas de adhesión, fuerzas de capilaridad por lo que la presión efectiva es menor que la atmosférica. Se distinguen tres sub-zonas:

- zona de evapotranspiración: en las partes más próximas a la superficie, el contenido de humedad del suelo fluctúa debido a las variaciones de la evaporación y la transpiración de las plantas. Esta zona oscila en un espesor de 1 o 2 metros hasta 4 metros (depende del lugar). Las plantas llegan hasta donde hay aire, tomando las raíces sobre todo agua capilar aislada. La cantidad de agua que hay en el suelo y que pueden tomar las plantas se llama RAU (Reserva de Agua Utilizable). La capacidad de agua máxima que puede contener un suelo se la denomina Capacidad de Campo. El Punto de Marchitez es el límite inferior de agua a partir del cual las plantas no van a tener fuerza para succionar.

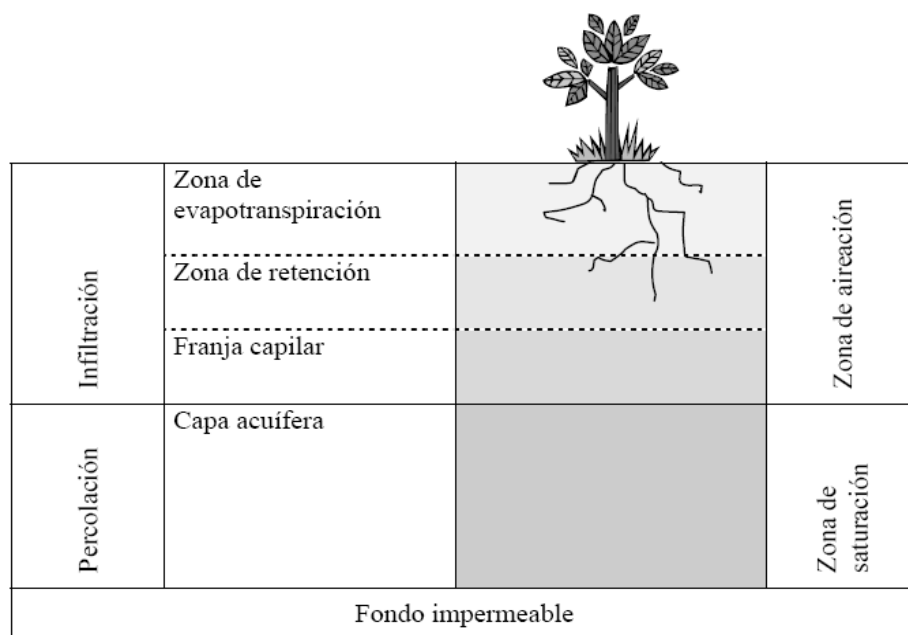


Figura 1.3. Repartición del agua en el suelo y subsuelo. Castany (1975)

- Zona intermedia o de retención: está inmediatamente por debajo de la anterior, en la cual el agua se desplaza por los poros debido a la acción de la gravedad y sin llegar a saturarlos.
- Franja capilar, donde el agua satura los poros y que, dependiendo de la granulometría, puede ascender por capilaridad

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 4 de 25 hojas

❖ Zona saturada:

Todos sus poros están ocupados o saturados con agua, siendo estrictamente este agua la denominada agua subterránea; su límite inferior corresponde a una roca cuya porosidad no permite la circulación del agua en profundidad. La presión del agua en esta zona es superior a la presión atmosférica y crece hidrostáticamente al aumentar la profundidad. El agua de esta zona se mueve naturalmente por gravedad hacia ríos, lagos, manantiales, mar, etc; y se provoca su movimiento hacia captaciones subterráneas especialmente: pozos, drenajes y galerías.

2 Cuencas Sedimentarias

Una cuenca sedimentaria es una depresión de la corteza terrestre, formada por la actividad tectónica de las placas, en la que se acumulan sedimentos. La persistencia de la depositación puede producir un grado adicional de depresión o subsidencia. Las cuencas sedimentarias, o simplemente cuencas, pueden tener forma de cubeta o de fosa alargada.

Las cuencas continentales se rellenan con sedimentos aluviales, fluviales y lacustres, con registro fuertemente asimétrico en los sentidos longitudinal y transversal.

La evolución y relleno de una cuenca sedimentaria está controlado por varios factores (tectónica, eustasia, área madre, clima, agentes de transportes, etc.). Teóricamente se habla de factores externos (subsidencia, clima) e internos (construcciones carbonáticas, agentes de transporte) pero excepto algunos casos es muy difícil separarlos.

Área madre: Los aportes que llegan a la cuenca dependen de la geología de la o las áreas madre. Esta puede ir cambiando a lo largo de la evolución de la cuenca (Petrología).

Clima: Influye tanto en el área madre como dentro de la cuenca en los sistemas depositacionales (Sedimentología, petrología).

Aportes: La cantidad de sedimentos que llegan a la cuenca y la que se producen dentro de ella influyen en la distribución de los mismos y en los sistemas depositacionales (Sedimentología, estratigrafía).

Los sedimentos pueden ser aportados por un río como se observa en la Fig. 1.4. En ese caso la distribución del tamaño de los sedimentos dependerá del cambio de energía que se produce en la corriente.

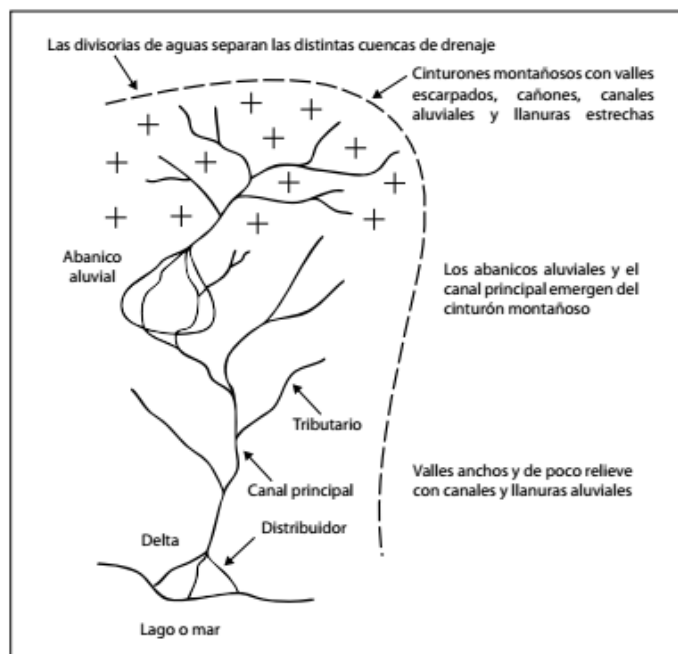


Figura. 1.4: Sistema de una red fluvial hipotética

2.1 Clasificación de los materiales en función a sus propiedades acuíferas

Las formaciones geológicas pueden clasificarse según el comportamiento que tienen respecto de las propiedades relacionadas con el agua en:

- Acuífugos: material que no tiene capacidad ni de almacenar, ni de transmitir agua. Por ejemplo: granito, mármol (no fracturados).
- Acuicludo: material que tiene la capacidad de almacenar agua, pero no de transmitirla. Por ejemplo: algunas arcillas.
- Acuitardo: material que tiene la capacidad de almacenar agua, pero la transmite muy lentamente. Por ejemplo: algunas arcillas.
- Acuífero: material que puede almacenar y transmitir agua.

En la Tabla 2.1 se resume el comportamiento de los materiales en función de las propiedades relacionadas con el agua.

Tabla 2.1. Comportamiento de los materiales en función de las propiedades relacionadas con el agua.

Material	Almacenar	Transmitir	Ejemplos
Acuífugo	NO	NO	Granito y mármol no fracturados
Acuicludo	SI	NO	Algunas arcillas
Acuitardo	SI	Muy lentamente	Algunas arcillas
Acuífero	SI	SI	Arenas

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 6 de 25 hojas

Estas formaciones se encuentran en la cuenca sedimentaria en forma intercalada como se observa en la Figura 2.1.



Figura 2.1: Distribución de las formaciones geológicas intercaladas en una cuenca.

3 Clasificación de los acuíferos

Tipos de Acuíferos, clasificación por presión y por porosidad.

Los acuíferos pueden clasificarse según dos criterios:

- ◆ En función de la presión hidrostática del agua contenida en ellos
- ◆ En función del tipo de porosidad

3.1 En función de la presión hidrostática del agua contenida en ellos, se clasifican en:

3.1.1 Acuífero libre o freáticos:

Se definen como aquellos en los que el límite superior de la masa de agua forma una superficie real que está en contacto con el aire de la zona no saturada y, por lo tanto, a presión atmosférica. Cuando se perfora un pozo desde la superficie del terreno, el agua aparece en el pozo cuando se alcanza el nivel freático y se mantiene a esa profundidad. Es un nivel real de agua.

3.1.2 Acuíferos confinados:

Son acuíferos cuyos límites superior e inferior están constituidos por materiales impermeables, denominados capas confinantes (acuicludos o acuífugos). El agua se encuentra a presión mayor que la atmosférica. Se puede definir un nivel donde el agua tiene presión igual a la atmosférica, este es un nivel potencial (no real) que se denomina nivel piezométrico estático, Figura 3.1. Durante la perforación de los pozos en acuíferos de este tipo, al atravesar el techo de los mismos se observa un ascenso rápido del nivel del agua hasta estabilizarse en el nivel piezométrico estático. Si se

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 7 de 25 hojas

estabiliza por debajo de la boca del pozo se lo denomina pozo artesiano (aunque este vocablo está cayendo en desuso), si se estabiliza por encima de la boca del pozo, se lo denomina pozo surgente.

3.1.3 Acuíferos semiconfinados:

Cuando una de las capas que limitan el acuífero deja circular el agua con lentitud. Es decir cuando una de las capas o ambas tienen comportamiento de acuitardo.



Figura 3.1. Tipos de acuíferos y su comportamiento. (Extraído del Instituto Geológico y Minero de España).

3.2 En función del tipo de porosidad del acuífero

En este caso importa la porosidad de la roca, de acuerdo a ella es la forma que toman los espacios vacíos dentro del material que dará un tipo de escurrimiento, se presentan los siguientes casos:

3.2.1 Porosidad primaria

Es cuando la porosidad se forma al mismo tiempo que se forma la roca sedimentaria o los depósitos sedimentarios. Estos acuíferos pueden ser:

3.2.1.1 Depósitos no consolidados de materiales sueltos:

Son formaciones geológicas constituidas por la acumulación de partículas transportadas por gravedad, viento o hielo; en ambiente lacustre o marino, se comportan como un material poroso, se los incluye en los acuíferos denominados detríticos (Figura 3.1). Suelen ser arenas o gravas de origen fluvial (como los que forman los materiales aluviales de los ríos o las terrazas de los mismos) o deltaico (si se trata de depósitos acumulados en la desembocadura de los ríos). Generalmente son de edades geológicas recientes. Pueden suministrar buen caudal explotadas convenientemente. Pueden estar formadas por arenas y gravas.

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 8 de 25 hojas

3.2.1.2 Rocas sedimentarias consolidadas:

Son sedimentos que se han consolidado debido a procesos de compactación y diagénesis. Una roca que forma este tipo de acuífero es la arenisca.

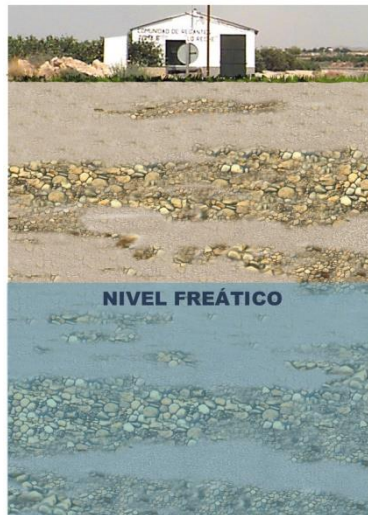


Fig. 3.1: Acuífero detrítico

3.2.2 Porosidad secundaria

Son aquellos acuíferos que están formados por una formación geológica en la que los poros se han formado luego de que la roca se ha formado. Podemos encontrar en este tipo de acuíferos los siguientes:

3.2.2.1 Acuíferos fracturados

Son acuíferos que se forman por rocas que en su origen son impermeables y que por procesos geológicos se han alterado formando diaclasas, fisuras o fracturas.

Las posibilidades de formar acuíferos en estas rocas quedan reducidas a la zona alterada superficialmente o a las fracturadas por fallas y diaclasas, que permiten una apreciable circulación del agua (Figura 3.2). Como ejemplo se puede mencionar el granito.

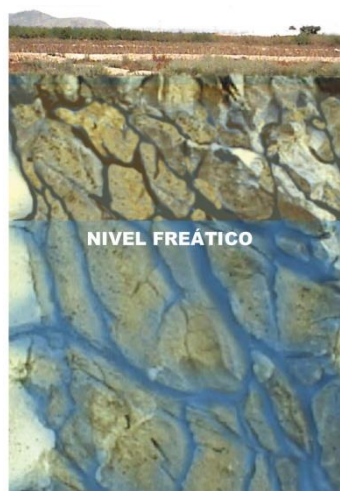


Fig. 3.2: Acuífero fracturado (Puede ser de roca ígnea o metamórfica)

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 9 de 25 hojas

3.2.2.2 Acuíferos kársticos

Son rocas que en su formación son impermeables, pero luego se alteran por procesos geológicos formando fisuras, luego por procesos químicos de disolución del carbonato se van formando canalículos que con el pasar del tiempo van aumentando de tamaño, se dice que son materiales karstificados (Figura 3.3). Como ejemplo de este tipo de rocas están las calizas y las dolomías.

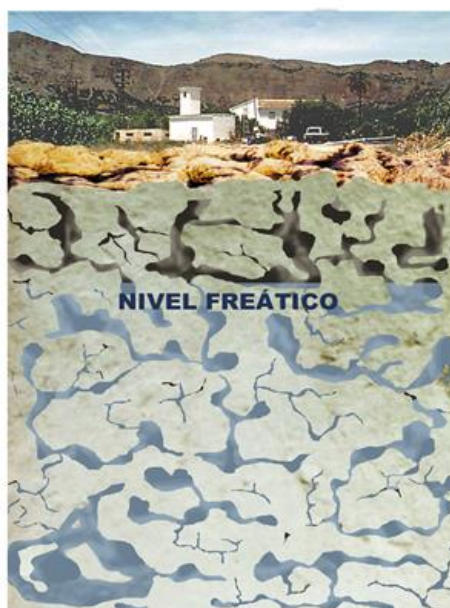


Fig. 3.3: Acuífero kárstico (Puede ser de caliza o dolomías)

4 Relación aguas superficiales y subterráneas

4.1 Distintos tipos de cuencas

4.1.1 Cuenca Hidrográfica:

Se llama cuenca Hidrográfica a la unidad que está definida por la topografía, es fácilmente identificable y delimitable con un mapa topográfico (Fig. 4.1). Esta unidad corresponde al lugar geométrico donde una molécula de agua precipitada se moviliza aguas abajo por influencia de la gravedad y alcanza un curso fluvial; es el dominio de las aguas superficiales.

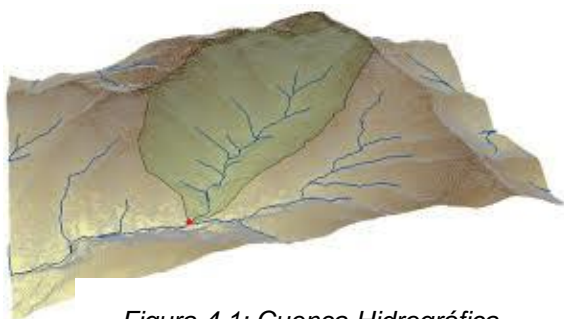


Figura 4.1: Cuenca Hidrográfica

También puede llamarse Cuenca Hidrológica superficial

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 10 de 25 hojas

4.1.2 La cuenca Hidrogeológica:

A diferencia de la anterior, es un concepto que engloba exclusivamente a las aguas subterráneas y su configuración y límites están definidos por la estructura de las rocas (Fig. 4.2). Muchas veces puede existir coincidencia entre la cuenca hidrográfica y la cuenca hidrogeológica. También puede llamarse Cuenca Hidrológica Subterránea.

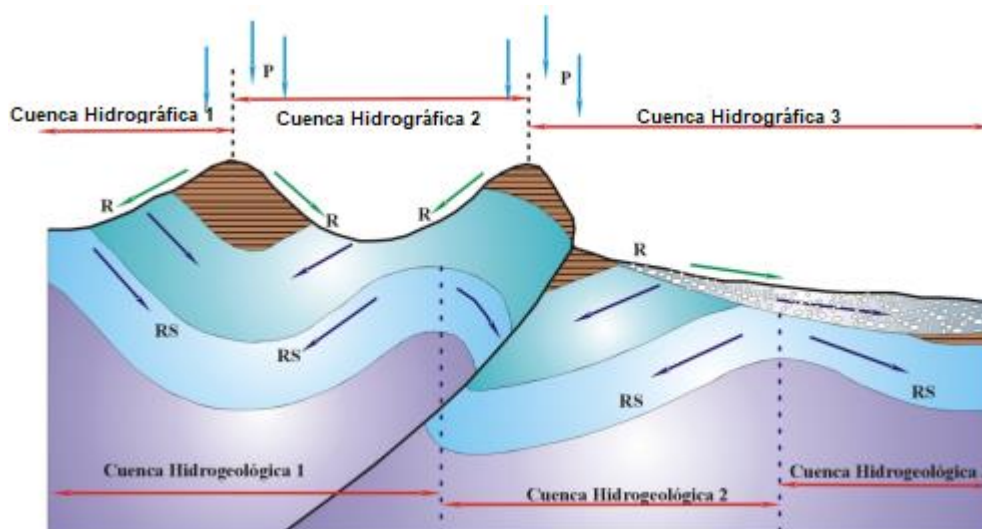


Figura 4.2: Cuenca Hidrográfica y cuenca Hidrogeológica (extraído de

4.1.3 Cuenca Hidrológica

Cuenca Hidrológica son unidades morfológicas integrales y además de incluir todo el concepto de cuenca hidrográfica, abarca toda la estructura subterránea del acuífero como un todo.

4.2 Fuente de recarga de las cuencas.

La fuente de recarga de toda cuenca es la precipitación. Las precipitaciones agrupan todas las aguas meteóricas recogidas en una cuenca hidrográfica o área determinada. Se presentan en forma líquida (lluvia, niebla, rocío) o sólida (nieve, granizo). Esta cantidad de agua así precipitada podrá o no enriquecer los acuíferos. Cuando el agua, en estado líquido o sólido, llega a la superficie de la Tierra, se dice que ha precipitado. El vapor de agua contenido en la masa de aire, a consecuencia de los cambios de presión y temperatura y del movimiento de estas masas, ayudado, en ocasiones, por minúsculos núcleos de condensación y material sólido en suspensión, se reúne en gotas de agua o en cristales de hielo y cae venciendo las resistencias que se oponen, hasta llegar a la superficie terrestre. La precipitación sólida amorfa es el granizo y cristalizada, se denomina nieve. La precipitación sobre una cuenca define el régimen hidrológico de la misma, esto es cuándo será la época de crecida y de estiaje de ese sistema hidrológico.

La precipitación es un fenómeno de tipo discontinuo y su distribución tanto en el espacio como en el tiempo es sumamente variable. La lluvia se mide por la altura que alcanzaría sobre una superficie ideal plana y horizontal, antes de sufrir pérdidas por

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 11 de 25 hojas

evaporación, infiltración y escurrimiento superficial.

Los aparatos destinados a cuantificar la cantidad de agua caída son:

- Pluviómetro ordinario: Mide cantidad de lluvia recibida en un intervalo de tiempo, comprendido entre dos lecturas consecutivas. Consiste en un colector cilíndrico con boca horizontal y de sección conocida. Una probeta graduada según la superficie de la boca, mide la altura de agua recogida.
- Pluviómetro totalizador: Se utilizan en lugares de difícil acceso, donde las lecturas sucesivas se hacen separadas por intervalos amplios de tiempo (hasta un año). Por lo tanto tienen un colector de mayor capacidad que los anteriores, y en él se vierten, previamente medidas, sustancias que evitan la evaporación (por ejemplo vaselina) y en zonas frías otras que ayuden a la fusión de la nieve (cloruro cálcico anhidro).
- Pluviógrafos: Registran en forma continua la variación de la lluvia con el tiempo. Existen tres tipos fundamentales basados en otros tantos principios; pesajes sucesivos, vaciado por sifonación de un depósito, o registro del vertido de volúmenes fijos.

Para la medida de la nieve pueden emplearse los pluviómetros ordinarios o totalizadores con el aditivo de sustancias que facilite su fusión. Obteniendo de esta manera, el equivalente en agua de la nieve. Se debe mencionar también que la evaluación del rocío puede ser muy importante, especialmente en aquellas regiones de climas áridos y semiáridos. Para el estudio de una determinada extensión superficial de terreno, es preciso estimar a partir de los datos obtenidos en unos cuantos puntos de observación, valores aplicables al conjunto de la zona. El primer paso es reunir los datos básicos y completar las series haciéndolas homogéneas en tamaño y calidad por procedimientos estadísticos. Determinar el dominio de esta situación es un problema a resolver para cada caso en particular, teniendo en cuenta el fenómeno meteorológico y la zona de estudio. Se entiende por lámina de agua caída en una zona, a la altura que alcanzaría el agua sobre la superficie de una cuenca, considerando que ésta permanece en ella sin ningún tipo de pérdidas (sin escurrir, evaporarse o infiltrarse). Su valor resulta del cociente entre el volumen precipitado (m^3) y la superficie (m^2) de la cuenca y se expresa en milímetros. Con este procedimiento se determina el valor P de la ecuación del balance global. Los procedimientos utilizados para su cálculo son:

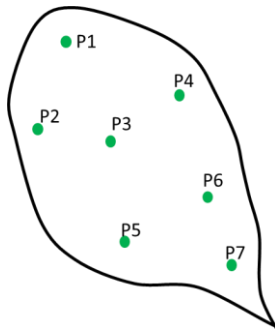
- a. Método de la media aritmética
- b. Método de los polígonos de Thiessen
- c. Método de las curvas Isohietas

4.2.1 Método de la media Aritmética:

Este método provee una buena estimación si las estaciones pluviométricas están:

- distribuidas uniformemente dentro de la cuenca,
- el área de la cuenca es bastante plana y,
- la variación de las medidas pluviométricas entre las estaciones es pequeña.

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 12 de 25 hojas



$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

Estación	Pi (mm/mes)
P1	105
P2	100
P3	110
P4	98
P5	102
P6	100
P7	96
Pmedia	101,6

Donde:

P_i es la precipitación puntual en la estación i

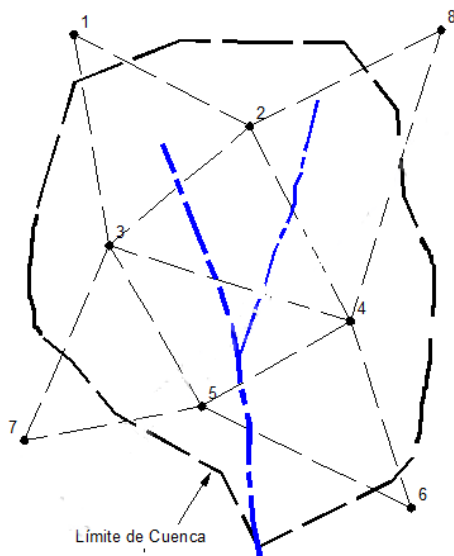
n : el número de estaciones dentro de los límites de la cuenca en estudio.

4.2.2 Método de los polígonos de Thiessen:

Este método se puede utilizar para una distribución no uniforme de estaciones pluviométricas, provee resultados más correctos con un área de cuenca aproximadamente plana, pues no considera influencias orográficas. El método cuenta con tres pasos

4.2.2.1 Primer Paso

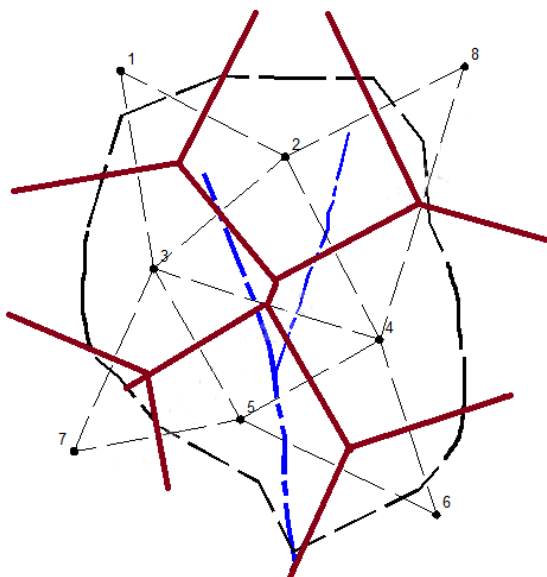
Unir cada estación vecina dentro de la cuenca y cercanas fuera de la cuenca con una recta, como se puede observar en la siguiente Figura.



4.2.2.2 Segundo Paso

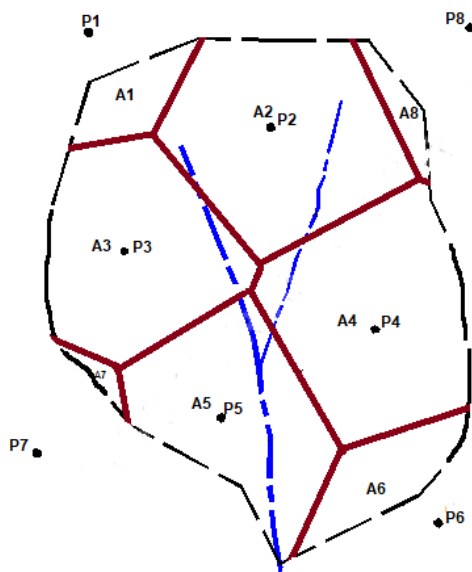
Por el centro de cada recta trazar una recta perpendicular para que al unir esas nuevas rectas se formen los polígonos.

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 13 de 25 hojas



4.2.2.3 Tercer Paso

Relacionar cada polígono con el área que le corresponde de cada estación. De tal manera que la Precipitación se calcula de la siguiente manera, sería una precipitación media ponderada por el área de influencia de cada polígono.



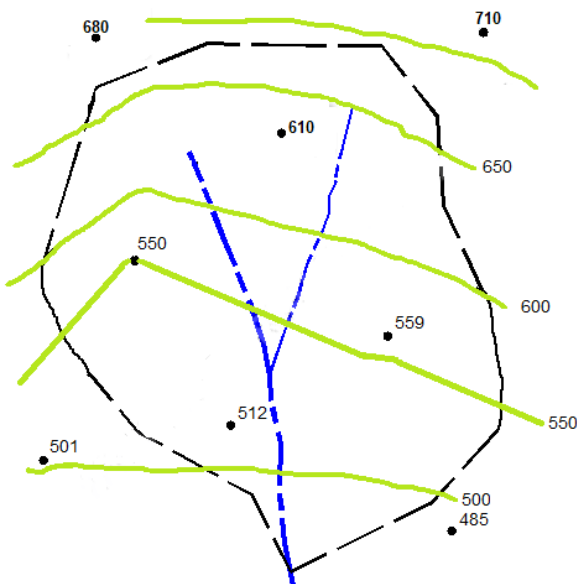
Estación	P _i (mm/mes)	A _i (km ²)
1	105	25
2	100	120
3	110	105
4	98	150
5	102	110
6	100	46
7	96	5
8	107	15
P_{media}	102,3	A_T=576,0

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i A_i}{A_T}$$

4.2.3 Método de las curvas Isoyetas:

Es el método más preciso, pues permite la consideración de los efectos orográficos en el cálculo de la lluvia media sobre la cuenca en estudio. Se basa en el trazado de curvas de igual precipitación de la misma forma que se hace para estimar las curvas de nivel de un levantamiento topográfico.

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 14 de 25 hojas



Sobre la base de los valores puntuales de precipitación en cada estación dentro de la cuenca, se construyen, por interpolación, líneas de igual precipitación:

Para poder calcular la precipitación total sobre la cuenca se puede calcular como:

$$P = \frac{\sum_{j=1}^m [(P_j + P_{j+1})/2] A_j}{\sum_{j=1}^m A_j}$$

4.3 Relación aguas superficiales y subterráneas.

El escurrimiento es la parte del ciclo hidrológico, en la cual el agua precipitada circula sobre la superficie del continente iniciando el retorno, ya sea hacia el mar, hacia la zona de recarga de algún acuífero, o para llegar a algún reservorio superficial desde donde se evapora. El escurrimiento es un fenómeno estrictamente superficial del agua. Los factores fisiográficos que afectan el drenaje superficial son, entre otros, el uso y tipo de suelo, pendiente topográfica, superficie de la cuenca hidrográfica, etc. Las características litológicas y estructurales (la geología) de una cuenca hidrográfica determinan entre otros, la densidad de drenaje y el tipo de red hídrica. La conjunción de factores geológicos (litología, permeabilidad, estructura, etc.), climáticos y fisiográficos determinará si una cuenca presenta un patrón dendrítico, pinnadas, rectangulares, paralelas, enrejado, anulares, centripetas, radiales, etc.

Para el cálculo del escurrimiento fluvial, es necesario realizar mediciones de caudal o Gasto = Q, o sea el volumen de agua que pasa por una sección de un río en un tiempo determinado. Estas mediciones se denominan aforos. Existen numerosos métodos para realizar aforos, en función de las características de los cursos de agua y del nivel de exactitud requerido en las mediciones. Por el tipo de magnitudes medidas se pueden clasificar en métodos directos o volumétricos e indirectos (velocidad de flujo como flotadores y molinetes, químicos y de nivel).

Uno de los aspectos más sobresalientes en el caudal de un río y que desde el punto de vista hidrogeológico tiene relevancia es el concepto de Caudal Básico que se obtiene a partir del análisis de un hidrograma (Fig. 4.3). En un hidrograma de un curso fluvial cualquiera, durante un período en el cual no se registran lluvias, el escurrimiento fluvial en ese momento solo está compuesto por el aporte de agua subterránea y el hidrograma decae siguiendo la forma de una curva exponencial. Cuando el curso fluvial recibe agua de los reservorios subterráneos, el nivel freático desciende, dejando cada vez menos agua subterránea para alimentar a los cursos fluviales. Sino se repone el agua a los reservorios subterráneos, el caudal base hacia los cursos se

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 15 de 25 hojas

volvería cero.

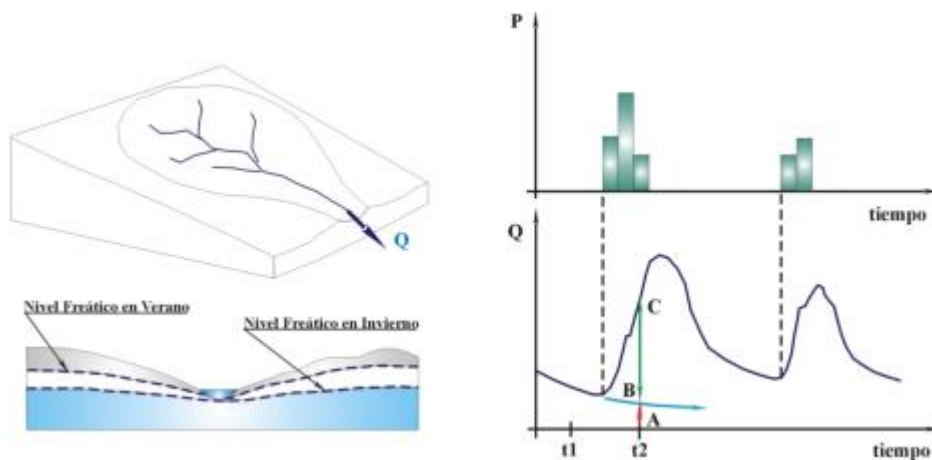


Figura 4.3: Hidrograma y caudal básico luego de una lluvia en una cuenca.

En el instante t_1 todo el caudal del curso fluvial se debía al Esguerrimiento Básico (que en este caso es el esguerrimiento subterráneo). En el instante t_2 , parte del caudal Q (el segmento AB) será debido al Esguerrimiento Básico y otra parte (BC) será debido al Esguerrimiento Directo.

La respuesta de un curso fluvial a las precipitaciones está en función de numerosos aspectos tales como intensidad y distribución de las lluvias, ambiente climático imperante, dimensiones de la cuenca hidrográfica, tipo de suelos y rocas, vegetación, etc. De acuerdo a la región climática considerada, un curso fluvial puede comportarse como influente o efluente, respecto al agua subterránea

Se dice que un curso es influente cuando aporta agua al reservorio subterráneo y, es efluente cuando recibe aportes desde los acuíferos. Un curso fluvial, en un mismo año (según la época considerada) puede ser influente o efluente; también, a lo largo de su extensión, un curso de agua puede ser influente y en otro efluente, o viceversa.

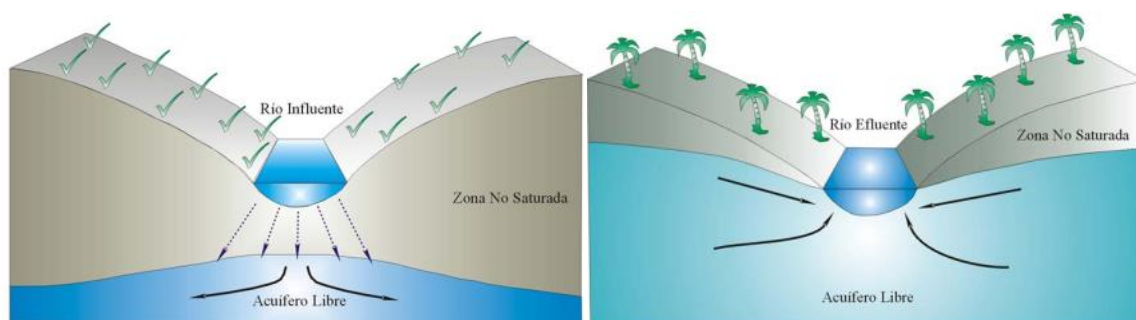


Figura 4.4: Río Influyente y río efluente.

Otro elemento que se representa una relación entre la superficie y el acuífero, son los llamados manantiales o vertientes.

El funcionamiento de los manantiales resulta muy claro si, se tiene en cuenta que, por

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 16 de 25 hojas

lo general, son simplemente el desagüe o salida de un medio poroso o embalse subterráneo que recibe una cierta recarga o infiltración. Así pues, los dos factores más importantes a considerar serán los parámetros geométricos e hidrológicos del embalse subterráneo y sus condiciones de recarga, casi siempre dependientes de modo principal de la infiltración de las precipitaciones.

En la Fig. 4.5 se muestra la relación entre área de recarga (km^2), recarga anual en (m) y el caudal (l/s).

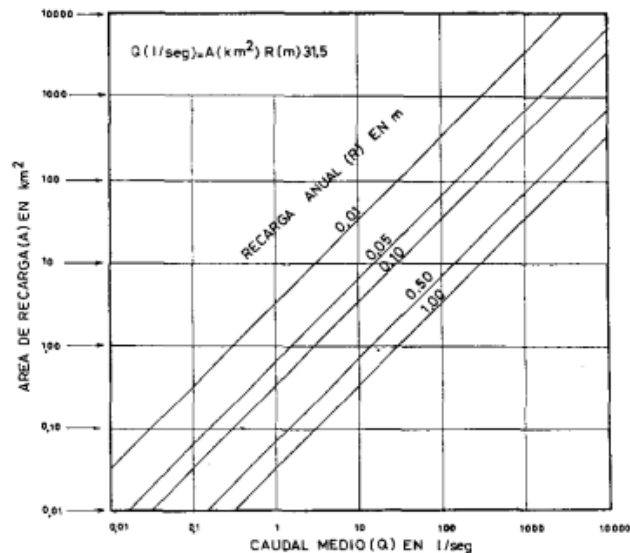


Figura 4.5: Relación entre el área de recarga, el caudal medio y la recarga media anual de un manantial. (Custodio y Llamas, 1996)

Los manantiales de un reservorio subterráneo en un terreno homogéneo están fundamentalmente controlados por las relaciones entre el límite de la zona saturada y la superficie del terreno como se ve en la Fig. 4.6.

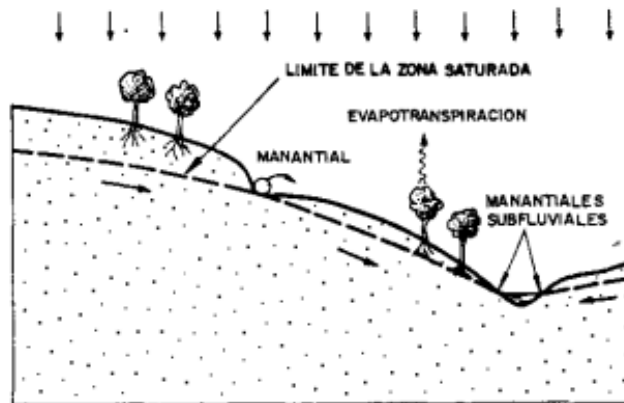


Figura 4.6: Manantiales cuando la superficie freática y la superficie del terreno. (Custodio y Llamas, 1996)

Cuando la geometría de la formación acuífera permeable es de dimensiones más reducidas que los accidentes topográficos, el contacto entre la zona saturada y la superficie del terreno, y por consiguiente, los manantiales, suelen encontrarse en las proximidades de la zona de contacto entre las formaciones permeables e impermeables. Así, en la figura 4.7 se representa el caso de un pequeño acuífero

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 17 de 25 hojas

formado por los materiales sueltos del cono de deyección de un barranco, que se apoyan sobre materiales impermeables; situaciones análogas se producen en las masas de derrubios de ladera de las zonas montañosas; estas estructuras no suelen dar lugar a grandes manantiales, dado el reducido tamaño del embalse subterráneo que originan.

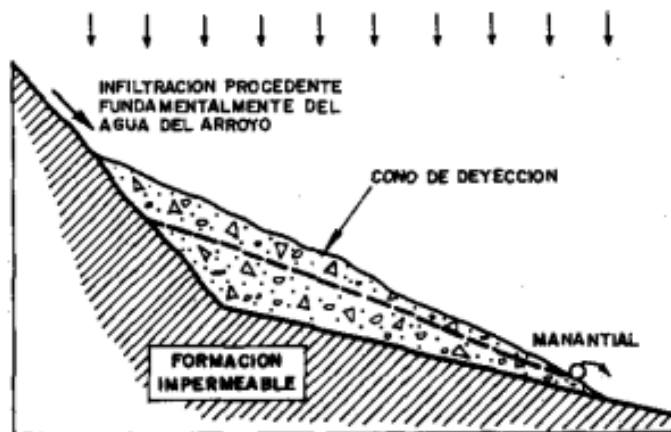


Fig. 4.7: Manantial que drena un cono de deyección cuya base está formada por terrenos impermeables (Custodio y Llamas, 1996)

En la figura 4.8 se representa una estructura parecida, pero constituida por dos formaciones con distinta permeabilidad; se supone que la capa de gravas inferior tiene mayor permeabilidad y por ello actúa a manera de colector o dren de la zona saturada de la colada basáltica superior.

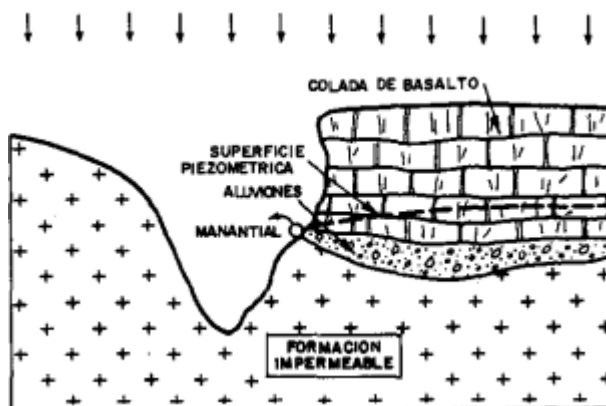


Figura 4.8: Manantial que drena una formación basáltica poco permeable a través de los aluviones de un valle fosilizado por la colada volcánica está formada por terrenos impermeables (Custodio y Llamas, 1996).

Los plegamientos y las fallas pueden influir notablemente en la configuración geométrica de los embalses subterráneos y en los procesos de disminución o aumento de porosidad o permeabilidad de sus materiales. En la figura 4.9 se esquematiza una estructura sinclinal que origina un acuífero confinado cuya descarga se hace por el flanco en que la erosión hace aflorar la capa acuífera a nivel más bajo.

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 18 de 25 hojas

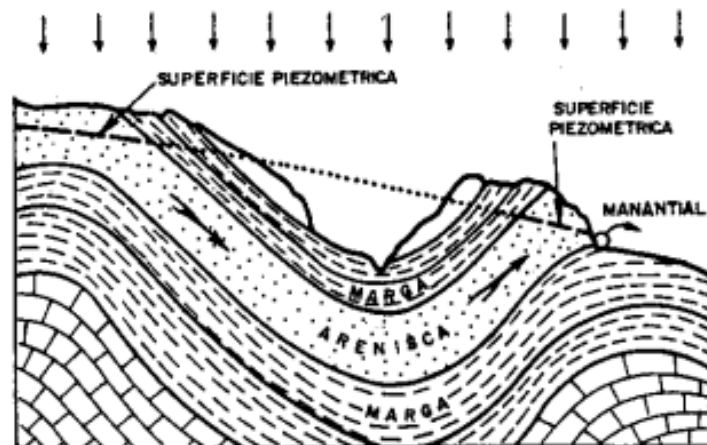


Figura 4.9: Manantial que drena un acuífero confinado (Custodio y Llamas, 1996).

También existen manantiales en las zonas de descargas de los acuíferos, donde se producen manantiales o vertientes de flujo vertical que se localizan en las partes más bajas de la cuenca (ver zonas de recarga y descarga).

4.4 Mediciones de caudales.

Para medir el caudal de los ríos se realizan mediciones directas puntuales o también mediciones continuas. Medir el caudal de un río se realiza a través de aparatos (molinetes) que pueden medir la velocidad del río y midiendo la profundidad del río en distintos puntos se logra conocer el área de la corriente. Ver el siguiente video para observar el aforo de una corriente de agua:

<https://www.bing.com/videos/search?q=Hidrogeolog%c3%ada&&view=detail&mid=9177B9F80C9CE895C5429177B9F80C9CE895C542&&FORM=VDRVRV>

La descripción de los métodos de aforos directos e indirectos puede leerse en el siguiente documento de la Universidad de Salamanca.

<http://hidrologia.usal.es/temas/Aforos.pdf>

4.5 Potencial Hidráulico, líneas de flujo y superficies equipotenciales

El agua se mueve desde los puntos que tiene mayor energía a los de menor energía. La energía mecánica de una unidad de masa de agua es la suma de su energía potencial, su energía cinética y la energía de presión. En el agua subterránea la energía cinética es despreciable, por lo que generalmente no se tiene en cuenta. La energía total por unidad de masa se denomina potencial hidráulico y es igual a la h (altura de la columna de agua) multiplicada por g (aceleración de la gravedad). Como la aceleración de la gravedad (g) es prácticamente constante en una región, la variación de h refleja la variación del potencial hidráulico.

Una superficie equipotencial es el lugar geométrico de los puntos del espacio que tienen un mismo potencial hidráulico. El flujo se producirá perpendicularmente a las superficies equipotenciales, buscando el máximo gradiente. Como se observa en la

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 19 de 25 hojas

Fig. 4.10 en un medio homogéneo e isótropo.

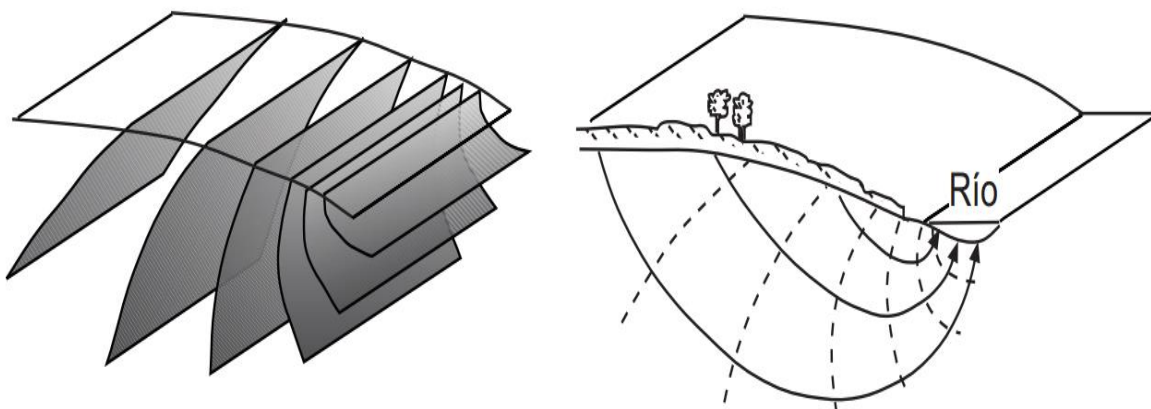


Figura 4.10: Superficies equipotenciales bajo una ladera y el correspondiente perfil con red de flujo (Extraído Sánchez San Roman).

Las representaciones se simplifican a través de dibujos en 2D con redes de flujo en perfiles verticales y mapas de isopiezas. Las líneas equipotenciales son la intersección de los planos equipotenciales con el plano que se dibuja la red.

El trazado de la red de flujo debe cumplir con estas condiciones:

- Las familias de las curvas deben cortarse perpendicularmente.
- Es conveniente que los espacios resultantes sean proporcionales para que se aproxime lo más posible a un cuadrado.

La forma de la superficie freática es la que gobierna toda la red (Fig. 4.11).

4.5.1 Flujos locales y regionales

La diferenciación es relativa, depende de la escala que consideremos. Los flujos locales normalmente están asociados a valles de menor entidad y los flujos regionales a los valles principales de una región.

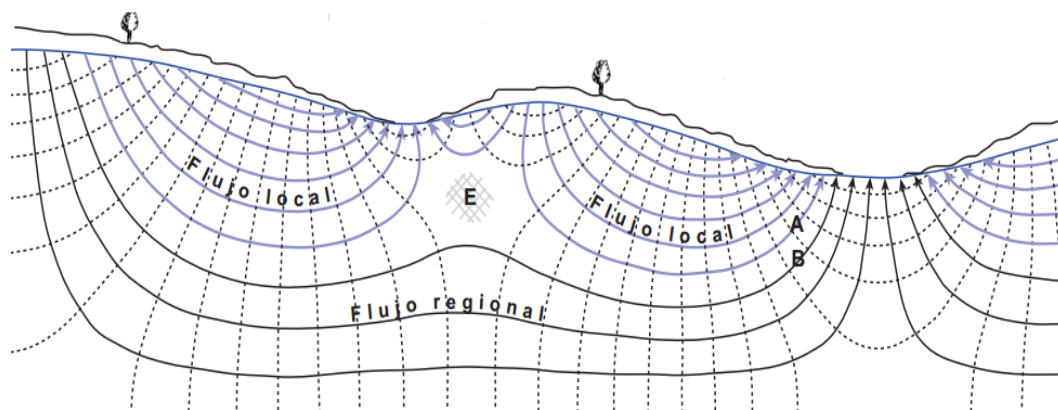


Figura 4.11: Red de flujo con los flujos regionales y flujos locales (Extraído Sánchez San Roman).

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 20 de 25 hojas

4.6 Áreas naturales de recarga y descarga. Zonas de surgencia natural. Corte esquemático de una cuenca hidrogeológica.

Las áreas de recarga son aquellas en que el flujo subterráneo presenta una componente vertical descendentes, y las áreas de descarga, ascendentes. Aunque en este esquema tienen escasa entidad, también existen áreas intermedias en las que el flujo es prácticamente horizontal. (Fig. 4.12).

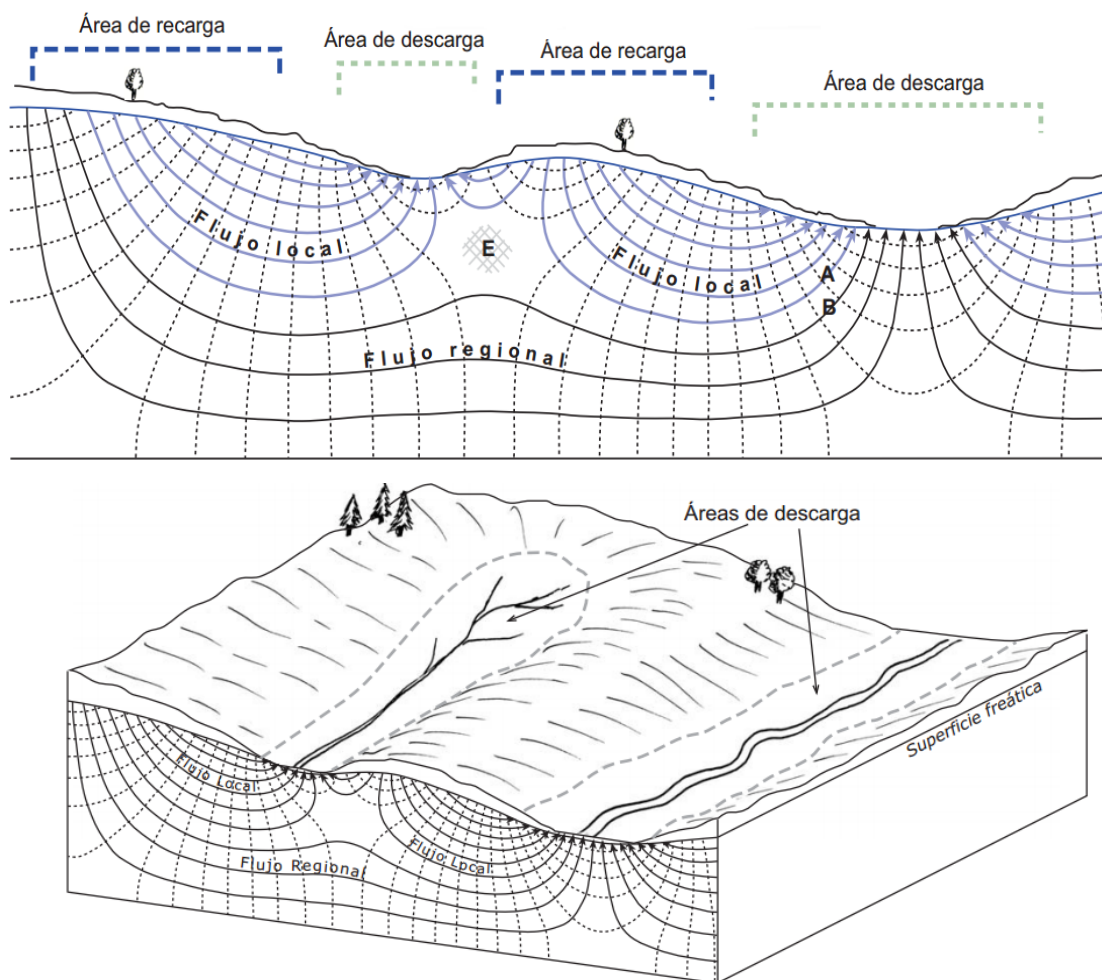


Figura 4.12: Localización de las áreas de recarga y descarga de la cuenca (Extraído Sánchez San Roman).

Las áreas de descargas son áreas de descarga natural, donde se generan corrientes de agua o manantiales o vertientes de flujo vertical características de estas zonas.

4.6.1 Flujo descendente y ascendente en áreas de recarga y descarga

Considerando un caso similar al de la Fig. 4.10 que hay una zona de recarga desde una ladera.

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 21 de 25 hojas

Si sobre una equipotencial se realizan tres sondeos abiertos sólo en el fondo (Fig.4.13) el freático de la zona, y sirve de referencia para marcar la altura del agua en los sondeos B y A, donde el agua subirá hasta la altura de C por tener el mismo potencial hidráulico y no llegará hasta el nivel freático en ese punto.

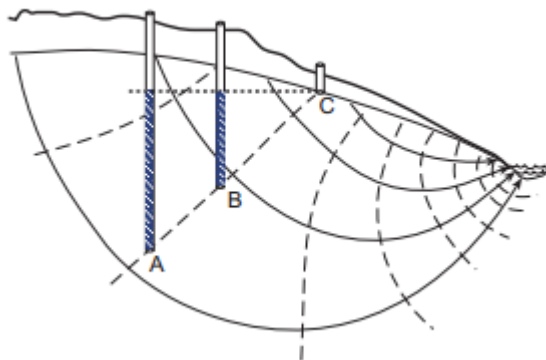


Figura 4.13: Sondeos abiertos en la misma equipotencial tienen el mismo nivel (Extraído Sánchez San Roman).

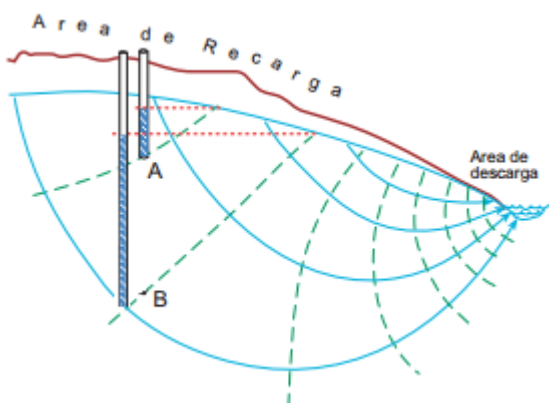


Figura 4.14: Sondeos abiertos en la misma vertical pero en potenciales distintas. (Extraído Sánchez San Roman).

Si ahora se consideran dos sondeos abiertos en el fondo en la misma vertical, pero en líneas equipotenciales distintas (Fig. 4.14), el nivel del sondeo A subirá más arriba que el del sondeo en B. Porque A está abierto en una superficie de mayor potencial que el pozo B. La altura a la que subiría puede deducirse desde el punto que la equipotencial correspondiente corta a la superficie freática.

Si analizáramos toda una región donde tuviéramos un área de recarga, una zona intermedia y un área de descarga, y colocáramos en cada sector dos pozos casi en la misma vertical pero abiertos a distintas profundidades (Fig. 4.15).

En los pozos localizados en el área de recarga se observa que el nivel es más alto en el pozo poco profundo ya que está abierto en una equipotencial de mayor energía.

En los pozos que están en el área de descarga por el contrario, el pozo menos profundo presenta un nivel más bajo que el profundo, debido a que este pozo más superficial está abierto en una equipotencial de menor energía.

En la pareja de pozo que está en la zona intermedia los niveles de los pozos, el más somero y el más profundo, son similares porque al ser las equipotenciales casi verticales están abiertos en la misma equipotencial.

Si no disponemos de la red de flujo y contamos con dos pozos cercanos a distintas profundidades, midiendo los niveles de los mismos nos daremos cuenta en que sector del acuífero estaremos, si en la zona de recarga, intermedia o de descarga.

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 22 de 25 hojas

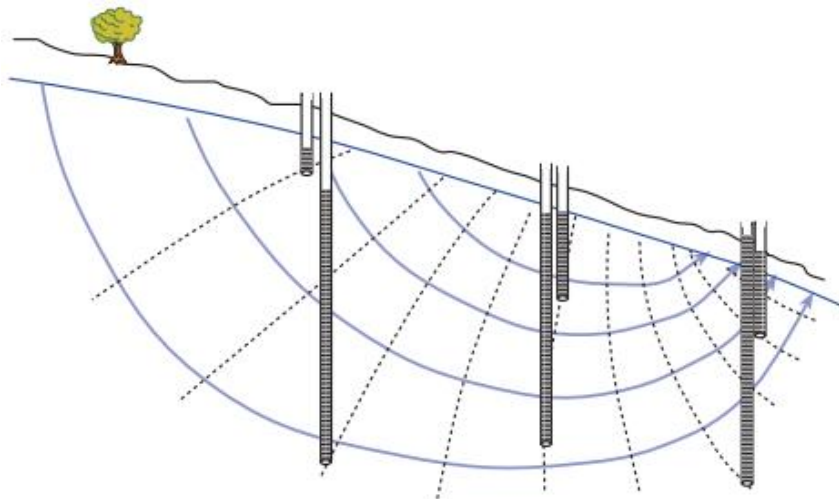


Figura 4.15: Comparando los niveles en dos sondeos próximos podemos identificar en qué sector del acuífero se encuentra. (Extraído Sánchez San Roman).

En la Fig. 4.16a se observa que el potencial hidráulico Z es mayor que en X, por lo que el flujo será ascendente en alguna de las direcciones indicadas en la figura.

En la Fig. 4.16b, el pozo menos profundo tiene más potencial que el profundo, el flujo tendrá una componente vertical descendente.

En la Fig. 4.16c no existirá flujo vertical, ya que los potenciales en ambos pozos son similares y el flujo es horizontal.

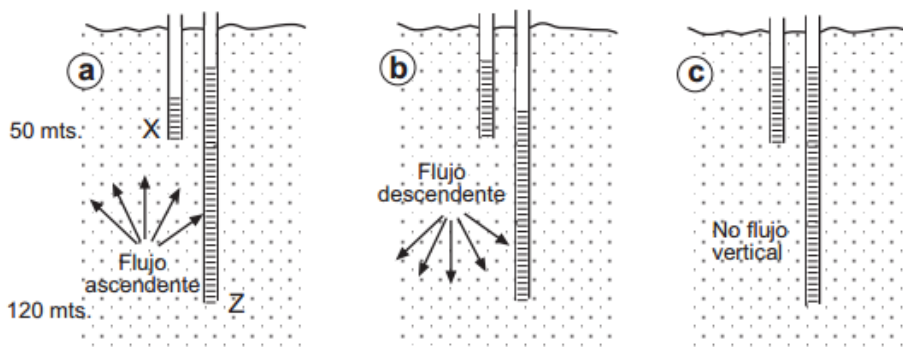


Figura 4.16: Observación componente vertical de flujo en sondeos próximos (Extraído Sánchez San Roman).

Cuando el medio no es homogéneo, el flujo cambia de dirección al pasar de un medio a otro de distinta permeabilidad, siguiendo comportamientos similares a la refracción de la luz u otras ondas, se aleja de la normal si pasa a un medio de mayor permeabilidad y se acerca a la normal si el medio es de menor permeabilidad (Fig. 4.17).

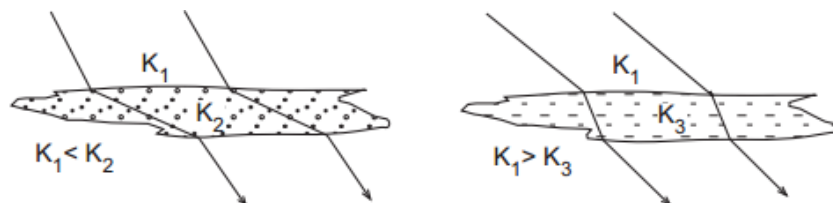


Figura 4.17: Desviación de las líneas de flujo al a un medio de diferente permeabilidad (Extraído Sánchez San Roman).

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 23 de 25 hojas

4.6.2 Mapas de isopiezas

En el apartado anterior hemos observado el flujo vertical que puede darse en los pozos debido a las zonas donde estén ubicados. Para conocer la componente horizontal hay que comparar varios niveles en pozos de profundidad similar y distantes y obtener un mapa de isopiezas.

Un mapa de isopiezas refleja la forma de la superficie freática o de la superficie piezométrica, según el tipo de acuífero (libre o confinado), igual que un mapa topográfico refleja la forma de la superficie del terreno (Fig. 4.18).

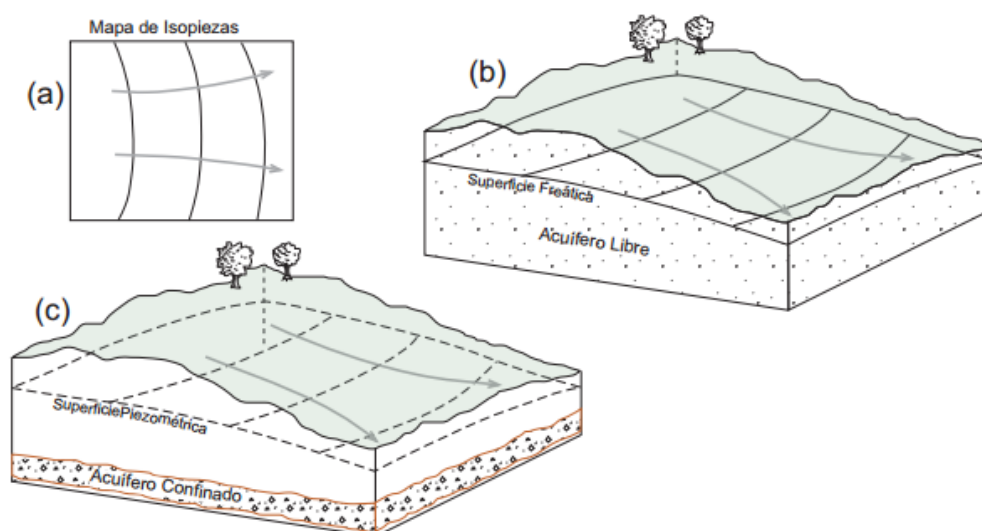


Figura 4.18: El mapa de isopiezas (a) puede representar la forma de la superficie freática de un acuífero libre (b) o la forma de la superficie piezométrica de un acuífero confinado (c). (Extraído Sánchez San Roman).

La superficie freática es una superficie real, que constituye el límite superior de la parte saturada del acuífero libre (Fig. 4.18b), mientras que en el acuífero confinado o semiconfinado (Fig. 4.18c), la superficie piezométrica es una superficie virtual, definida por la altura a la que llegaría la columna de agua si existiera un piezómetro en cada punto.

En el acuífero libre, las líneas isopiezas son la intersección de las superficies equipotenciales con la superficie freática (Fig. 19a), mientras que en el confinado las superficies equipotenciales están, lógicamente, dentro del acuífero, mientras que la superficie piezométrica con sus curvas isopiezas se encuentran varios metros por encima (Fig.19b). En ambos casos se generan iguales mapas de isopiezas. El mapa es la representación del flujo tridimensional sobre un plano horizontal. En el acuífero confinado, las superficies equipotenciales son verticales, por lo que el flujo es horizontal, la representación en 2D (dos dimensiones) no implica pérdida de información.

En cambio, en el acuífero libre (Fig. 19a), las superficies equipotenciales no son verticales, por lo que el flujo no es horizontal. El mapa de isopiezas refleja solamente una parte de la información, la componente horizontal de flujo. Faltaría la red de flujo en vertical.

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 24 de 25 hojas

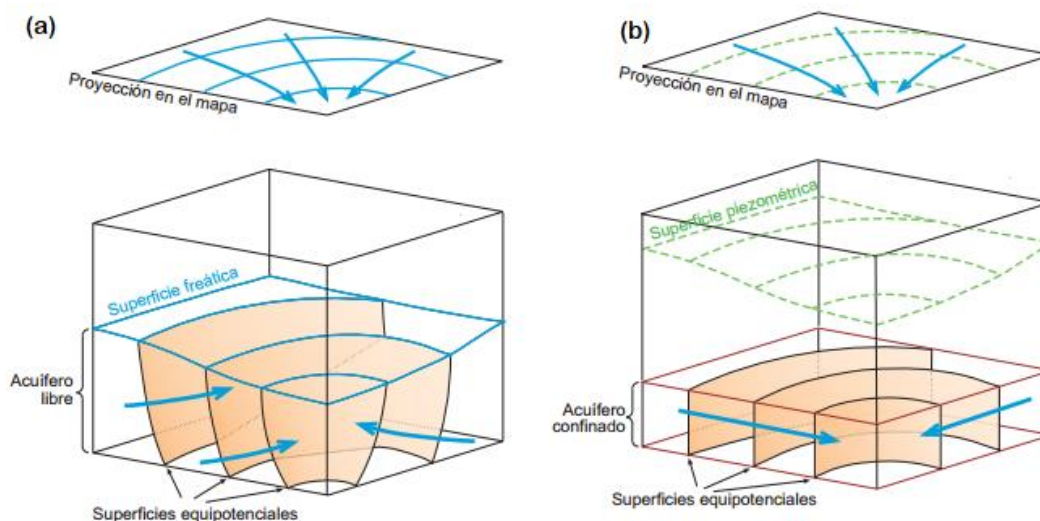


Figura 4.19: Superficies equipotenciales en un acuífero libre con componente vertical de flujo y en un acuífero confinado con flujo horizontal (Extraído Sánchez San Roman).

Si existe un río efluente (ganador) o influente (perdedor), las curvas isopiezas deberían adaptarse como se indica en la Fig. 4.20.

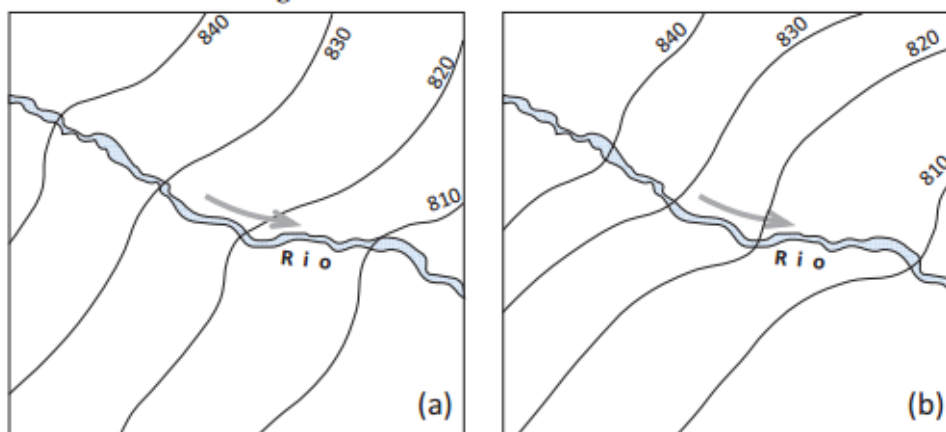


Figura 4.20: La superficie piezométrica de un acuífero superficial tendrá forma de valle bajo un río ganador (a) y adquirirá descendencia según la dirección de flujo en un río perdedor (b). (Extraído Sánchez San Roman).

4.7 Variaciones de niveles de la cuenca.

Los niveles de una cuenca aumentan en la época de recarga del sistema hidrológico y sufren un descenso en el estiaje. El nivel natural del sistema se lo denomina Nivel Estático, que es un nivel de equilibrio del sistema natural, y varía siguiendo las épocas de recargas y de estiaje.

Facultad de Ingeniería UNCuyo	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 2	Hoja Nº 25 de 25 hojas

5 Bibliografía

Castany, G. 1975. Prospección y Exploración de las Aguas Subterráneas. Ediciones Omega, S.A. Barcelona.

Custodio, E y M.R Llamas. 1996. Hidrología Subterránea. Tomos I y II. Segunda Edición Corregida. Editorial Omega. España.

Fetter, C.W. 1988. Applied Hydrogeology. Second Edition. Macmillan.

Sanchez San Román, Javier. Hidráulica Subterránea: Conceptos Básicos. Universidad de Salamanca. <http://hidrología.usal.es>

Schuldz, C.J. y García; R., 2015. Aguas Subterráneas. Balance Hídrico y Recarga de Acuíferos. Asociación Internacional de Hidrogeólogos, Grupo Chileno. Universidad Nacional de La Pampa. Universidad Nacional de Salta.