



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"ACATLAN"

**"DISEÑO, CONSTRUCCION Y MANTENIMIENTO DE
POZOS PROFUNDOS"**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

JOSE TORRES GARCIA

ASESOR: ING. JORGE ESTEBAN ATHALA MOLANO



ACATLAN, EDO. DE MEX.

JUNIO 2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta 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.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

COPIA

INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS

||

A DIOS, POR HABERME PERMITIDO CULMINAR ESTA ETAPA DE MI VIDA.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: JOSE TORRES
GARCIA

FECHA: 08 - JUNIO - 04

FIRMA: 

*A MIS PADRES, JOSÉ Y SALUSTIA, QUE CON SU GRAN ESFUERZO, DEDICACIÓN Y
TENACIDAD ME ENSEÑARON EL CAMINO DE LA VERDAD.*

A MI ESPOSA, ESTELA POR SU INTERMINABLE APOYO.

A MIS HERMANOS

ESTHER

HÉCTOR

MARTÍN

Y GUSTAVO

POR HABERME DADO SU APOYO INCONDICIONAL EN TODO MOMENTO.

EN ESPECIAL A MI HERMANA GABRIELA QUIEN CONTRIBUYÓ CON VARIAS HORAS DE TRABAJO EN LA CORRECCIÓN DE ESTILO Y MECANOGRAFÍA DE ESTA TESIS.

A MI ASESOR DE TESIS, ING. JORGE ESTEBAN ATHALA MOLANO, POR SACRIFICAR PARTE DE SU TIEMPO Y TRANSMITIRME PARTE DE SUS CONOCIMIENTOS PARA QUE ESTA TESIS SEA HOY UNA REALIDAD.

ÍNDICE

Introducción	ix
Capítulo 1	
Aspectos fundamentales del agua subterránea	1.1
1.1 Ventajas y desventajas de la explotación del agua subterránea	1.1
1.2 Importancia del agua subterránea en el abastecimiento de diferentes zonas metropolitanas	1.3
1.3 Conceptos fundamentales	1.6
1.3.1 Tipos de acuíferos	1.8
1.3.2 Porosidad, rendimiento específico y coeficiente de almacenamiento	1.12
1.3.3 Conductividad hidráulica y transmisividad	1.21
Capítulo 2	
Diseño de pozos profundos	2.1
2.1 Elementos que forman un aprovechamiento hidráulico subterráneo	2.1
2.2 Estudios de hidrología subterránea	2.3
2.3 Diseño e los elementos que forman un pozo	2.7
2.3.1 Determinación de la profundidad	2.8
2.3.2 Obtención del diámetro de la perforación	2.8
2.3.3 Zonas por cementar	2.10
2.3.4 Elección de la tubería de ademe	2.10
2.3.5 Distribución de los elementos liso y ranurado	2.19
2.3.6 Elección de la abertura de las ranuras del ademe	2.22
2.3.7 Elección del tamaño de las gravas para el filtro	2.24
Capítulo 3	
Construcción de pozos profundos	3.1
3.1 Tipos de perforación	3.1
3.2 Elección del equipo de perforación	3.19
3.3 Colocación de ademes	3.22
3.4 Cementación y contraademe	3.26
3.5 Colocación de filtro de grava	3.27
3.6 Colocación del tapón de fondo del pozo	3.29
3.7 Prueba de verticalidad	3.31
3.8 Desarrollo y aforo	3.37
Capítulo 4	
Mantenimiento de pozos profundos	4.1
4.1 Mantenimiento preventivo	4.1
4.1.1 Inspección con cámara de t.v.	4.1
4.1.2 Aforos	4.2
4.1.3 Medición de los niveles estático y dinámicos	4.6
4.1.4 Revisión del equipo de extracción	4.11
4.2 Mantenimiento correctivo	4.16
4.2.1 Desincrustaciones	4.16
4.2.2 Rescate del quipo atrapado	4.20
4.2.3 Desazolve	4.24
4.2.4 Encamisados	4.24

Capítulo 5	5.1
Diseño y construcción de un pozo profundo localizado en el municipio de Ecatepec, Estado de México	
Conclusiones y recomendaciones	6.1
Bibliografía	7.1

INTRODUCCIÓN

“Nadie hecha de menos el agua hasta que se seca el pozo”

Reza un refrán popular

El agua es un elemento esencial para los procesos de la vida animal y vegetal, influyendo en su existencia y desarrollo. Su disponibilidad y lo accesible que sea para su uso por el hombre, permitirá un desarrollo amplio o limitado en todos los aspectos, incluyendo los primordiales de salud, hasta los que regulan el nivel de vida en la humanidad desde los puntos de vista social y económico de las poblaciones agrícolas, industriales y urbanas.

La humanidad ha utilizado las aguas subterráneas desde tiempos muy remotos, lo cual le ha permitido tener un desarrollo permanente. Se tiene conocimiento que los aprovechamientos del vital líquido se basaba en la captación de las surgencias naturales, la extracción a partir de pozos someros o norias, el drenaje de los acuíferos superficiales mediante galerías y toda una serie de obras rudimentarias que permitían aflorar al exterior el agua almacenada en el subsuelo; de hecho, muchos de los sistemas de riego de la época medieval que han persistido hasta nuestros días fueron posibles merced a que los cauces superficiales que los sustentaban eran alimentados por acuíferos que permitían la regularización natural de los caudales circulantes.

La verdadera revolución en la utilización de las aguas subterráneas debe situarse en el tercio central del pasado siglo XX, ligada a tres hechos esenciales: La invención de la bomba de turbina, que posibilita la extracción de importantes caudales de agua a grandes profundidades; los avances en la tecnología de perforación de pozos, que permiten progresar en su ejecución tanto en los aspectos relativos a profundidades como a diámetros; el desarrollo científico y práctico de la hidrogeología cuantitativa, que da cumplida explicación a los mecanismos de funcionamiento de aguas subterráneas.

En México, el agua que proviene de mantos subterráneos representa el 80% del volumen que se consume en el país. Por ejemplo, en las zonas áridas o semiáridas, que representan alrededor del 50% del territorio nacional, significan la fuente de abastecimiento más importante y a veces la única disponible.

La presente tesis está conformada por cinco capítulos, el primero da a conocer aspectos generales y relevantes del agua subterránea en México y algunos otros países, mencionando desde luego sus ventajas e importancia en el abastecimiento, así como sus desventajas. Se dan a conocer conceptos fundamentales para el estudio del agua subterránea. El segundo capítulo muestra de

forma sencilla, clara y objetiva el diseño de pozos profundos. El tercero señala la construcción de pozos profundos, desde los tipos de perforación hasta la terminación del mismo, sin dejar de mencionar las diferentes etapas constructivas. El cuarto trata del mantenimiento tanto preventivo como correctivo que se le da al pozo profundo durante su vida útil. EL quinto y último capítulo muestra en forma práctica el diseño y construcción del pozo profundo No. 308, ubicado en el municipio de Ecatepec de Morelos, Estado de México.

CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES DEL AGUA SUBTERRANEA

1.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA EXPLOTACION DEL AGUA SUBTERRANEA

El abastecimiento de agua sólo puede provenir de dos fuentes: la superficial y la subterránea. Dentro de las primeras se puede mencionar a los lagos, ríos, lagunas, etc., dentro de las fuentes subterráneas se encuentran las formaciones geológicas porosas y con alta permeabilidad conocidas como "acuíferos", siendo explotados estos últimos mediante pozos, manantiales y galerías horizontales.

Debido a que el agua superficial es un elemento con el que comúnmente estamos familiarizados, se pensaría que ésta es la mayor fuente de abastecimiento de agua dulce, *"en realidad, algo menos de un 3 por ciento de la disponibilidad de agua dulce fluida, de nuestro planeta tierra, corresponde a ríos y lagos. El 97 por ciento restante, algo así como 1,230 kilómetros cúbicos de agua se encuentran en el subsuelo."*¹

En la ingeniería, como en otras actividades, un problema tiene múltiples soluciones. Definitivamente la mejor solución será aquella que proporcione los mayores beneficios al menor costo.

Partiendo de lo anterior, si se requiere comparar las ventajas o desventajas que tienen la explotación del agua subterránea en relación a la superficial, ambas como solución al problema de suministro hidráulico, deberá hacerse un estudio para cada caso en particular y así poder evaluar cual de las dos alternativas es la mejor. No obstante existen ciertas cualidades naturales de las fuentes subterráneas, que le proporcionan ventajas sobre los aprovechamientos superficiales, entre los más importantes se pueden mencionar los siguientes:

- a) Menor susceptibilidad de contaminación.
- b) Debido a que el agua subterránea se encuentra distribuida en grandes áreas, su aprovechamiento puede ser en el lugar que se necesita o muy cercano a él, evitando grandes obras de conducción, como ocurre con la superficial.
- c) Para que el agua superficial pueda ser aprovechada en cantidades significativas es necesario hacer obras de almacenamiento. En cambio los recursos hidráulicos subterráneos tienen sus vasos de almacenamiento naturales.

¹ Edward E. Johnson "El Agua Subterránea y los Pozos"

- d) Un aspecto ligado al anterior, es que las fuentes subterráneas, por no tener su superficie expuesta a los rayos del sol su evaporación es nula, excepto cuando el nivel freático es muy somero, lo que provoca pérdidas por evapotranspiración.
- e) Otro hecho importante lo constituye el que la falta de lluvia repercute inmediatamente en la escasez de agua superficial, esto generalmente no sucede con los recursos hidráulicos subterráneos, ya que éstos tienen reservas que se han acumulado durante siglos.

Así como existen ventajas inherentes al agua subterránea, también existen desventajas, debidas principalmente a que ésta no es visible, lo cual dificulta su localización, cuantificación y observación de su comportamiento ante su explotación.

No obstante que el agua subterránea proporciona grandes beneficios, su sobre-explotación trae como consecuencia cierta problemática: como efecto inmediato de una explotación irracional se da el descenso progresivo del nivel freático, el cual trae como consecuencia un aumento en los costos del bombeo, inutilización de captaciones y disminución de su rendimiento, asentamiento del terreno y formación de grietas, daños ecológicos, en el caso de acuíferos costeros se provoca la intrusión salina.

Dada la gran importancia que ha adquirido el aprovechamiento del agua subterránea, debido entre otros aspectos a la contaminación de las aguas superficiales y al desarrollo industrial, agrícola y crecimiento de las poblaciones, es necesario prestar especial atención a su estudio, para que coadyuve a la administración y preservación del vital líquido en beneficio del hombre y la armonía de éste con la naturaleza.

No se debe olvidar, que si bien es cierto que el agua subterránea es un recurso renovable, ésta tiene sus limitaciones y de ignorarlas, se corre el riesgo de poner en peligro el futuro abastecimiento de agua y el consecuente deterioro de la economía de la región.

1.2 IMPORTANCIA DEL AGUA SUBTERRANEA EN EL ABASTECIMIENTO DE DIFERENTES ZONAS METROPOLITANAS

En algunos países, las fuentes superficiales para abastecimiento de agua, como lagos o ríos, satisfacen adecuadamente sus necesidades. En otros, son los acuíferos los que logran satisfacer la demanda del vital líquido. Sin embargo, es la combinación de ambas fuentes, la que técnica y económicamente, resulta más factible en la mayoría de los países. Por lo anterior, en muchas áreas urbanas el agua superficial y el agua subterránea son utilizadas para satisfacer el total de las necesidades de los habitantes, así como de los comercios e industrias.

1.2.1 IMPORTANCIA DEL AGUA SUBTERRANEA EN MEXICO

En la actualidad el agua procedente de fuentes subterráneas ha cobrado gran importancia, no sólo en México sino también a nivel mundial.

Si se toma en cuenta que las fuentes de agua superficial se muestran insuficientes ante las crecientes demandas de agua, producidas por la explosión demográfica. Y además que en gran parte el agua subterránea es el único recurso hidráulico disponible, se entenderá el por que éste recurso ha adquirido tanta importancia.

Hasta hace cuatro o cinco décadas la demanda de agua dulce era relativamente moderada y las fuentes de abastecimiento superficial eran suficientes para satisfacer esta demanda. Sin embargo, en los últimos 30 años se ha incrementado en forma por demás alarmante la demanda de agua, originada por el creciente desarrollo del país. Ante tal situación se ha tenido que recurrir cada vez con mayor frecuencia a la explotación del agua subterránea. En zonas áridas o semiáridas ha sido más evidente la utilización del recurso subterráneo, por ser la más viable alternativa para satisfacer sus crecientes demandas del vital líquido.

En México, predomina el clima desértico o semi-desértico, en más del 50% de su territorio. Lo cual hace que el agua subterránea sea la principal, y no pocas veces la única fuente de abastecimiento en estas regiones. Si bien es cierto, que existen regiones en las que la precipitación pluvial es abundante, también lo es el hecho, de que ésta, se da por temporadas, lo cual implica que para su aprovechamiento, se tengan que realizar grandes obras de almacenamiento y conducción, lo que muchas veces resulta antieconómico; ante esta situación surge el recurso subterráneo como una solución al suministro del vital líquido en zonas donde a priori, se pensaría que su utilización es innecesaria.

El agua subterránea adquiere importancia en México a raíz del crecimiento y tecnificación de la agricultura y la industria, además de la concentración de grandes grupos poblacionales, lo cual se comienza a dar en la época de los 40s. Anteriormente las fuentes superficiales eran suficientes para satisfacer la demanda y el agua subterránea se aprovechaba en pequeñas cantidades.

Debido a que el agua subterránea no sólo se utiliza para el consumo humano, si no también en la agricultura y la industria, su importancia adquiere mayor dimensión.

En la actualidad la mayoría de las poblaciones en nuestro país, complementan su abastecimiento de agua para consumo humano con el recurso subterráneo y en algunas de ellas, éste es el único disponible. En lo referente a la agricultura, su desarrollo depende de la disponibilidad de agua subterránea, ya que la mayoría de los nuevos proyectos no consideran a las fuentes superficiales como una solución a los problemas de riego. La mayoría de los desarrollos industriales dependen de aprovechamientos hidráulicos subterráneos.

A continuación se mencionan ejemplos de algunas ciudades extranjeras sobre la importancia en el uso del agua subterránea.

EL AGUA SUBTERRANEA EN BERLIN

Anteriormente Berlín satisfacía sus demandas hídricas utilizando, tanto fuentes superficiales como subterráneas, pero debido a la creciente contaminación de las primeras, se vio en la necesidad de depender exclusivamente de sus acuíferos.

Lamentablemente los niveles de bombeo del agua subterránea ha descendido constantemente, debido a las altas demandas del vital líquido.

EL AGUA SUBTERRANEA EN PARIS

París, la súper metrópolis ubicada en el Río Sena de Francia, es un ejemplo de una ciudad que hace uso tanto de fuentes superficiales como subterráneas. Anteriormente sus necesidades las satisfacían fuentes superficiales, concretamente el Río Sena, sin embargo, la creciente demanda del vital líquido obligó a los parisinos a completar su suministro con agua subterránea.

EL AGUA SUBTERRANEA EN KUWAIT

La nación de Kuwait, situada en la punta del Golfo Pérsico, no posee fuentes superficiales de abastecimiento y la precipitación pluvial es menor a 75mm por año.

Hasta hace aproximadamente 40 años, el agua potable era una comodidad que pocos poseían en Kuwait, ésta era casi en su totalidad importada del Río Shatt-Al-Arab en Iraq, y muy poca era extraída de pozos.

El progreso económico de Kuwait, debido a la exitosa explotación de sus recursos petroleros, permitió la costosa destilación de agua de mar.

Esta fuente de suministro juega un papel muy importante en el marco del suministro de agua en este país, no obstante, desde hace tres décadas el agua subterránea ha contribuido de manera considerable al suministro del vital líquido.

EL AGUA SUBTERRANEA EN ARABIA SAUDITA

Cerca de Kuwait se encuentra el reinado desértico de Arabia Saúdita. La capital Rayadh es abastecida por fuentes subterráneas de las que se extraen 250,000 m³ de agua diariamente; y se ha iniciado la desalinización del agua de mar para su utilización.

1.3 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

CICLO HIDROLOGICO

El ciclo hidrológico es una serie de procesos naturales mediante los cuales se realiza la continua circulación de agua en la tierra y la atmósfera.

Aunque si bien es cierto que el ciclo hidrológico no tiene un principio y un fin determinado por la naturaleza, para fines de estudio se considera que el inicio se da con la evaporación de los océanos, la que posteriormente da origen a las nubes y bajo ciertas condiciones, la humedad contenida en éstas se condensa provocando la precipitación en forma de lluvia, granizo o nieve.

Parte de esta precipitación cae directamente sobre los océanos, otra mas se deposita en la parte continental, alimentando ríos y lagos y otra parte se infiltra dentro del subsuelo. El agua que se precipita en los océanos se evaporará y reiniciará su función dentro del ciclo hidrológico.

Por lo que respecta al agua que se precipita sobre el continente ésta se podrá evaporar o descargar a un océano e incluso, como se mencionó anteriormente una gran cantidad pasará a formar parte del agua subterránea. El agua subterránea, al igual que la superficial, se mueve por fuerzas gravitacionales, por lo que ésta en algunas ocasiones aflora naturalmente a la superficie en manantiales o alimenta a algún río o lago, siempre y cuando el nivel freático se encuentre por encima de la plantilla de éstos, ver figura 1.1.

AGUA SUBTERRANEA Y SU DISTRIBUCION EN EL SUBSUELO

Agua subterránea es aquella que ocupa todos los vacíos dentro de un estrato geológico. Comprende toda el agua que se encuentra por debajo del nivel freático.

El agua subterránea proviene, en su gran mayoría, de aquella que se infiltra a través de los diferentes estratos de suelo, cabe mencionar que una mínima parte de la misma puede tener otros orígenes.

Debido a la importancia que tiene la infiltración en la aportación de agua subterránea, ésta ve incrementado su volumen principalmente en época de lluvias, a este incremento de volumen en época de lluvias, se le conoce como recarga del acuífero.

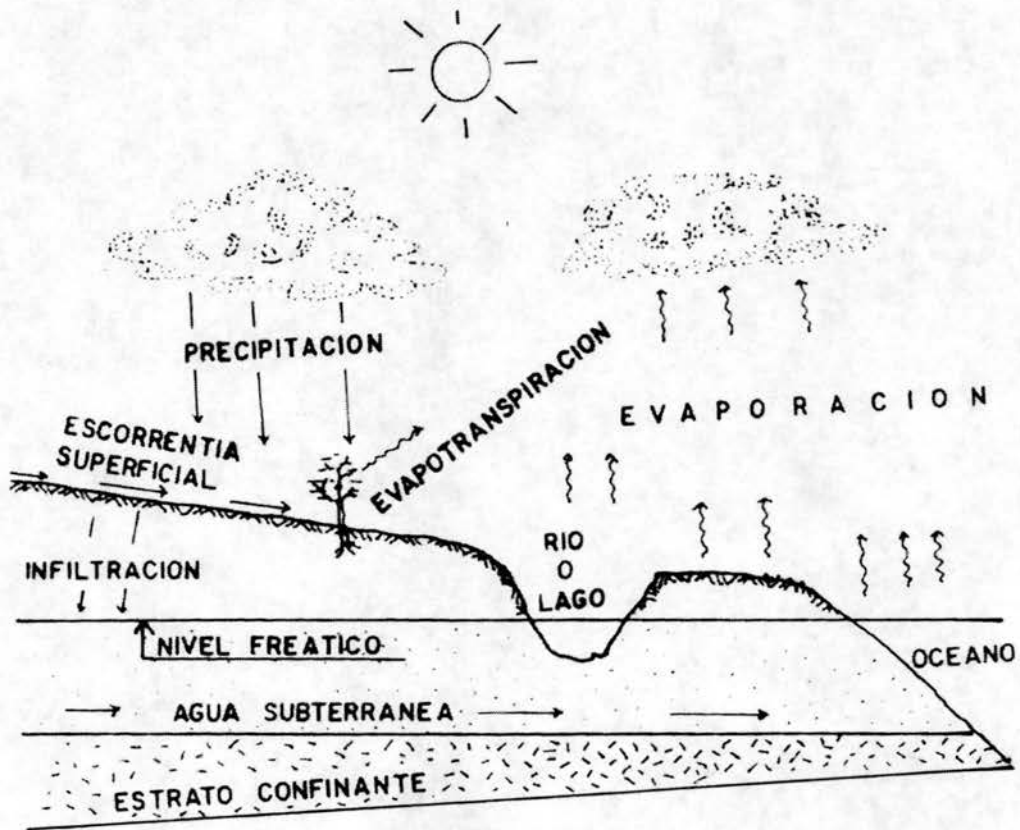


Figura 1.1 Esquema del ciclo hidrológico

DISTRIBUCION DEL AGUA EN EL SUBSUELO

El agua en el subsuelo se encuentra en dos grandes zonas: la de aereación y la de saturación.

La zona de aereación va desde la superficie del terreno hasta el nivel freático, esta zona se encuentra parcialmente saturada y se subdivide en: zona de agua del suelo, zona intermedia y zona capilar. En la zona de agua del suelo el contenido de humedad es muy variable, dependiendo de ciertos factores como la lluvia, el drenaje, el riego y la evapotranspiración. La zona intermedia contiene el agua "pelicular" que se encuentra adherida a los granos, es en esta zona donde se encuentra el agua "gravitacional", la cual se presenta en los períodos de infiltración. La zona capilar se encuentra inmediatamente arriba del nivel freático, la altura que alcanza el agua en esta zona depende de la granulometría del material y va desde unos cuantos centímetros en materiales gruesos, hasta varios metros en materiales finos.

La zona de saturación tiene como limite superior al nivel freático. Ver figura 1.2.

1.3.1 TIPOS DE ACUIFEROS

Acuífero.- "se denominan acuíferos aquellas formaciones o estratos comprendidos dentro de la zona de saturación, de los cuales se puede obtener agua con fines utilitarios. Un acuífero es una unidad geológica saturada, capaz de suministrar agua a pozos y manantiales, los que a su vez sirven como fuentes prácticas de abastecimiento."²

Otros nombres con los que se les conoce a los acuíferos es formación almacenadora o depósito de agua subterránea.

Desde el punto de vista hidráulico los acuíferos pueden ser de tres tipos:

- a) Confinados; son aquellos que se encuentran limitados en la parte superior y en la inferior por estratos impermeables. El agua contenida en estos acuíferos se encuentra a una presión mayor a la atmosférica, como se muestra en la figura 1.3.
- b) Semiconfinados; estos se encuentran limitados (arriba y abajo) por formaciones menos permeables que el mismo, a través de las cuales pueden recibir o ceder volúmenes significativos de agua. Ver figura 1.4.

² Edward E. Johnson "El Agua Subterránea y los Pozos"

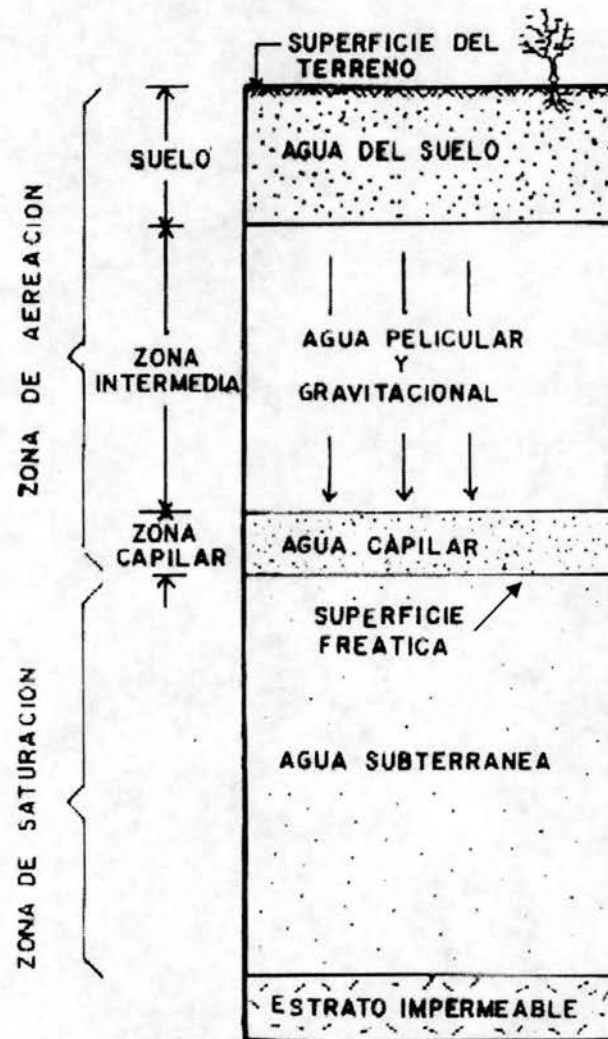


Figura 1.2. Esquema de la distribución del agua en el subsuelo

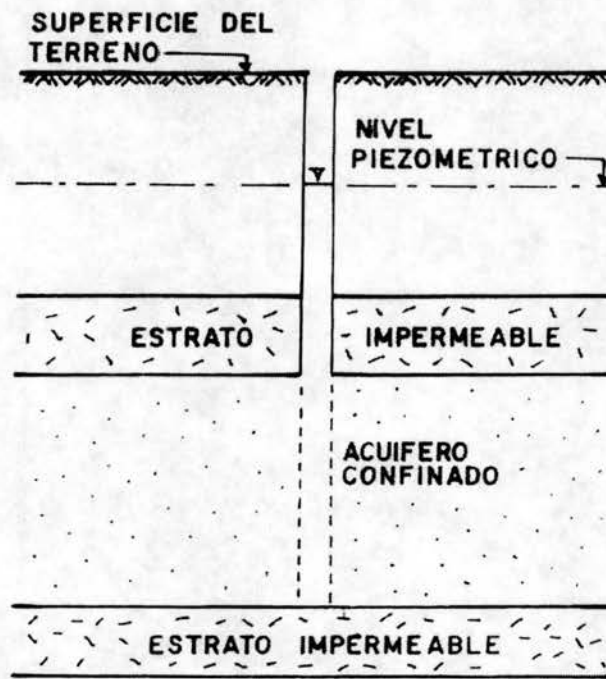


Figura 1.3. Acuífero confinado

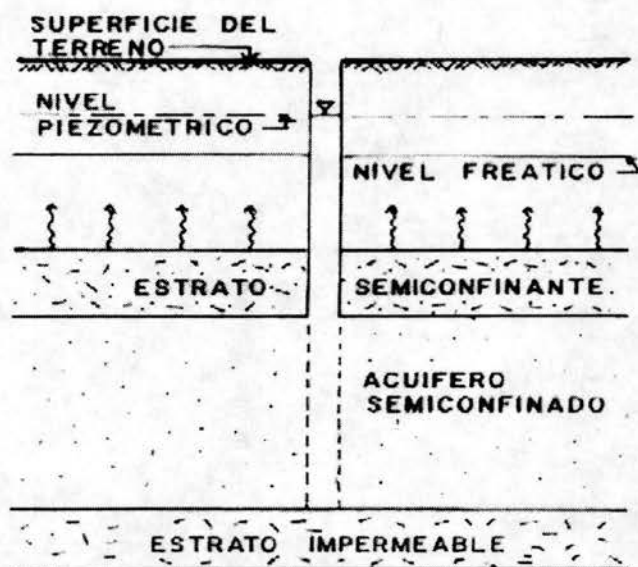
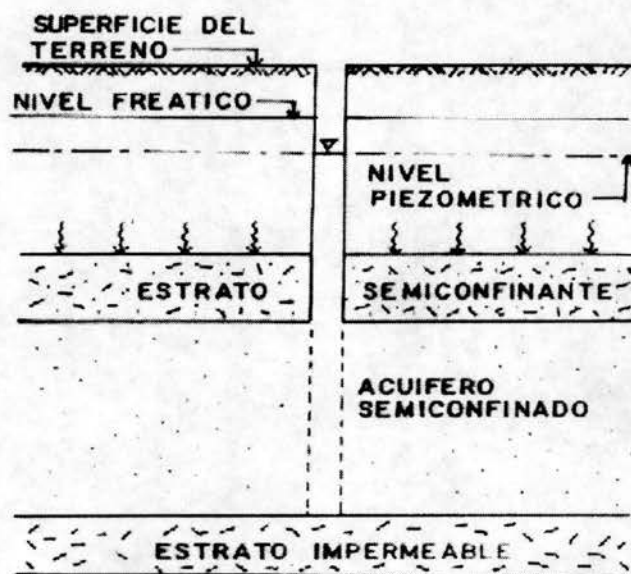


Figura 1.4. Acuíferos semiconfinados

- c) Libres; este tipo de acuíferos están limitados en la parte inferior por un estrato impermeable y tienen como límite superior el nivel freático, el cual se encuentra a la presión atmosférica. Lo anterior se ilustra en la figura 1.5.

Cuando un pozo capta el espesor de un acuífero confinado o semiconfinado, la superficie del agua se encuentra por arriba de lo que se considera el límite o "techo" superior del acuífero. Esta superficie imaginaria formada por los distintos niveles del agua en los pozos que penetran este tipo de acuíferos se llama "superficie piezométrica", su variación depende de los cambios de presión que presente el agua en el acuífero. Si la superficie piezométrica se encuentra por encima del terreno, entonces se presenta lo que se conoce como pozo artesiano o brotante. Ver figura 1.6.

Si se considera que un acuífero es capaz de suministrar agua en cantidades tales que su explotación sea redituable, entonces es necesario que la unidad geológica considerada como acuífero cumpla básicamente con dos condiciones físicas, la primera es que contenga agua suficiente por lo que deberá tener una alta porosidad (función almacenadora) y la segunda es que estos poros deberán estar conectados entre sí, para que el agua contenida circule a través de la formación (función transmisora). De lo anterior se desprende que no basta con una porosidad elevada, sino que además los poros deben estar interconectados ("porosidad efectiva") para que el agua pueda circular fácilmente hacia la captación.

1.3.2 POROSIDAD, RENDIMIENTO ESPECIFICO Y COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

La porosidad es el volumen de vacíos que contiene una roca o suelo con respecto al volumen total y se expresa en porcentaje.

$$n = \frac{V_v}{V_t} 100$$

Donde:

n = porosidad

V_v = volumen de vacíos de la roca o suelo

V_t = volumen total de la roca o suelo

Esta característica es importante, desde el punto de vista geohidrológico, dado que en la zona de saturación todos los vacíos están ocupados por agua; por lo tanto, la porosidad indica la cantidad de agua que contiene una roca por unidad de volumen en la zona de saturación.

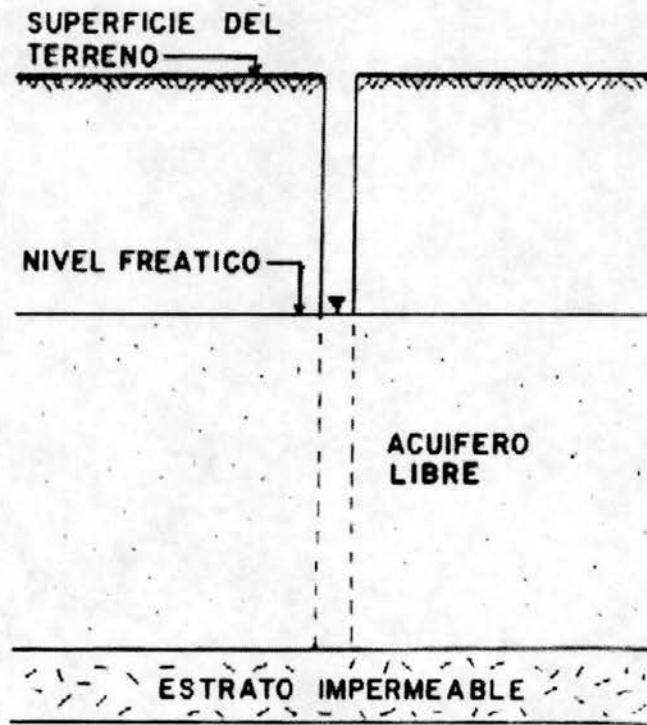


Figura 1.5 Acuíferos libres

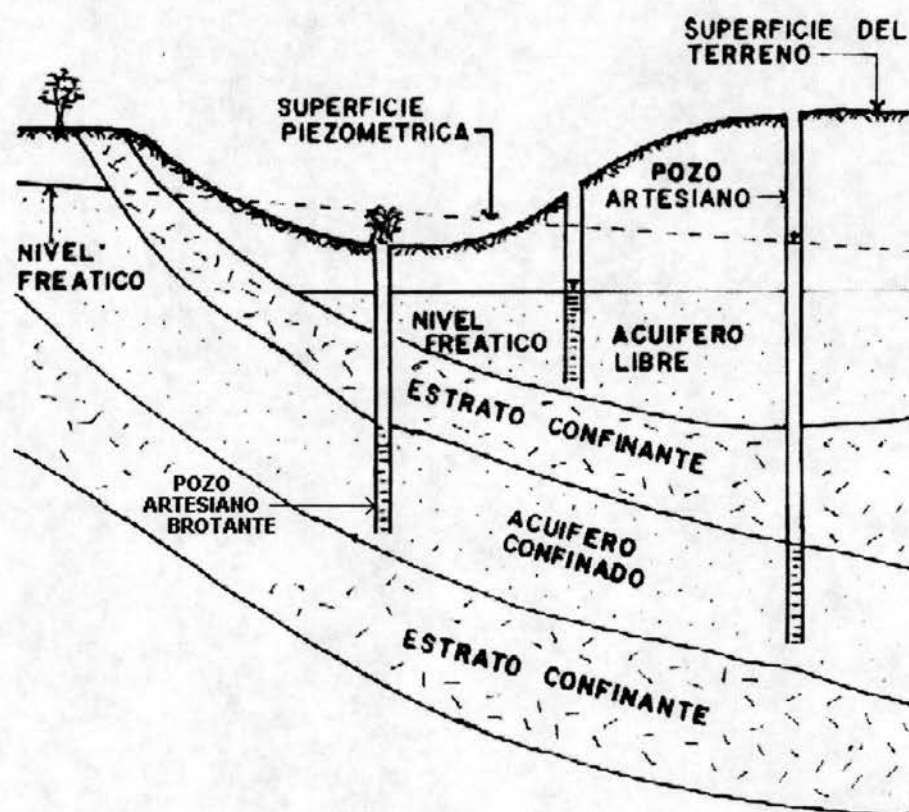


Figura 1.6 Pozos perforados en acuíferos libres y confinados

Por ejemplo, en una muestra de arena, cuyos volúmenes total y de vacíos obtenidos en el laboratorio fueron de 1000 cm^3 y 340 cm^3 respectivamente, la porosidad es la siguiente.

$$n = \frac{V_v}{V_t} (100)$$

$$n = \frac{340\text{cm}^3}{1000\text{cm}^3} (100)$$

$$n = 34.0\%$$

A continuación en la tabla 1.1 se presentan valores de la porosidad "n" de algunos suelos o rocas.

Suelo o Roca	n (%)	Sy (%)
Arcilla	40 a 70	1 a 10
Arena	25 a 50	10 a 30
Grava	25 a 40	15 a 30
Arenisca	5 a 30	3 a 15
Caliza	5 a 40	1 a 15
Basalto fracturado	5 a 50	1 a 10

Tabla 1.1 Valores de la porosidad y rendimiento específico de algunas rocas y suelos.

En la tabla anterior se puede observar que en los clásticos, la porosidad es inversamente proporcional al tamaño de grano, lo cual indica que rocas como las arcillas y los limos contienen más agua que las arenas o las gravas. Sin embargo, el que se tenga una porosidad alta no es determinante para asegurar que se puedan extraer volúmenes significativos de agua. Así por ejemplo una arcilla cuya porosidad es muy alta y en estado saturado contiene gran cantidad de agua, no puede considerarse como un acuífero, ya que el agua no se desplaza fácilmente. Por el contrario una arena saturada posee una porosidad considerable y además el agua circula fácilmente, por lo que una formación con estas características si se puede considerar como un acuífero.

La figura 1.7 muestra la estructura porosa de diferentes tipos de suelos y rocas.

Al drenar por gravedad cierto volumen de agua en el medio poroso de suelo o roca saturada, parte del agua contenida será liberada y parte será retenida en los poros por fuerzas de atracción molecular, adhesión o cohesión.

Del fenómeno anterior surgen dos conceptos fundamentales para el estudio del agua subterránea que son: el rendimiento específico y la retención específica.

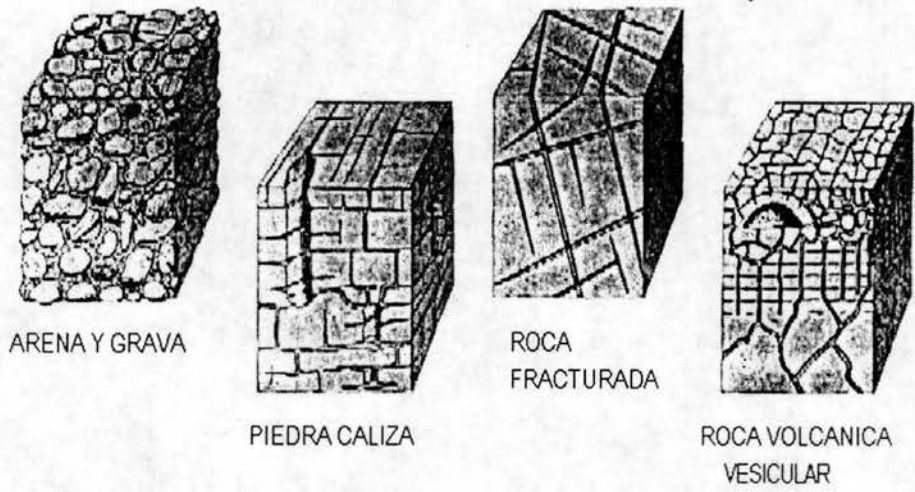


Figura 1.7 Principales suelos y rocas formadoras de acuíferos

Rendimiento específico.- Es el cociente que resulta de dividir el volumen de agua que drena una roca o suelo saturado, por acción de la gravedad, entre el volumen de la muestra. Tabla No. 1.1.

$$S_y = \frac{V_d}{V_t} 100$$

S_y = rendimiento específico

V_d = volumen de agua drenado por gravedad

V_t = volumen total de la muestra de roca o suelo

La definición de rendimiento específico se ilustra en la figura 1.8.

Retención específica.- Se define como el cociente que resulta de dividir el volumen de agua que queda retenido en los poros de la roca o suelo contra la acción de la gravedad, entre el volumen de la muestra de roca o suelo.

$$S_r = \frac{V_r}{V_t}$$

S_r = retención específica

V_r = volumen de agua retenido

V_t = volumen total de la muestra de roca o suelo

$$n = S_y + S_r$$

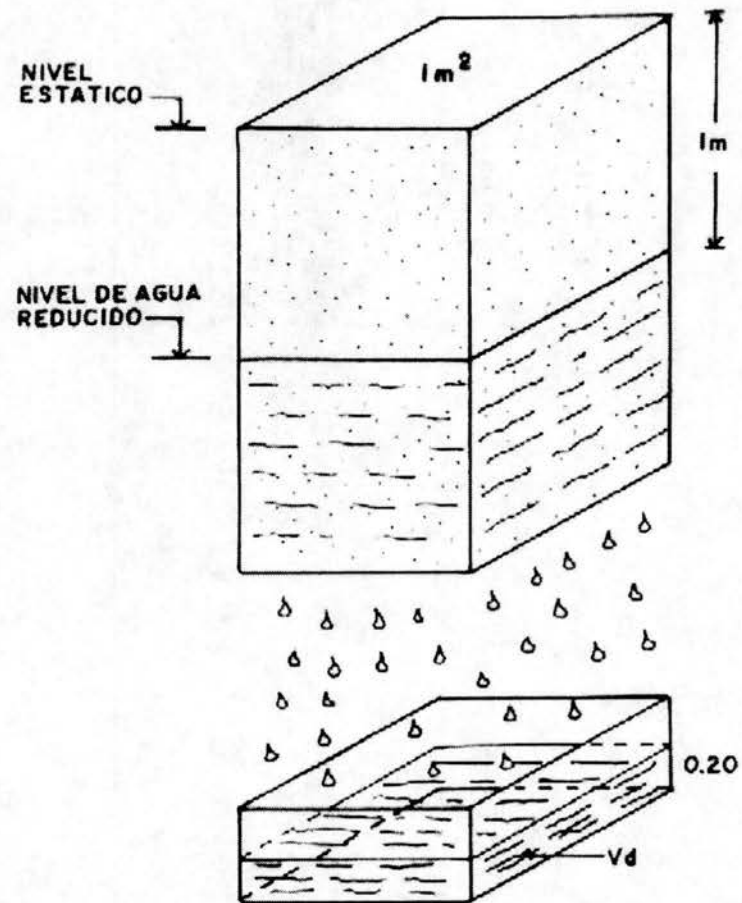
De lo anterior, se puede observar que en un suelo saturado, la porosidad es igual a la suma del rendimiento específico más la retención específica, si estos últimos se expresan en porcentaje.

Almacenamiento Específico (S_s).- Es la cantidad de agua liberada por unidad de volumen de material de roca o suelo, cuando la carga hidráulica decrece una unidad. Se expresa en unidades de 1/L (1/longitud).

Coefficiente de Almacenamiento (S).- Es la cantidad de agua liberada por una columna de área horizontal unitaria y altura igual al espesor saturado del acuífero, cuando la carga hidráulica decrece una unidad, es adimensional. La figura 1.9 muestra la definición del coeficiente de almacenamiento.

Ambos coeficientes mencionados anteriormente se relacionan con el espesor saturado del acuífero (b) mediante la ecuación: $S = S_s \times b$

Ejemplo: Se obtendrá el coeficiente de almacenamiento en un suelo cuyos datos aparecen en la figura No. 1.10 en el cual el Volumen drenado (V_d) es igual a $33,600\text{m}^3$



$$S_y = \frac{0.20}{1.0} \times 100 = 20\%$$

Figura 1.8 Rendimiento específico de una muestra de arena

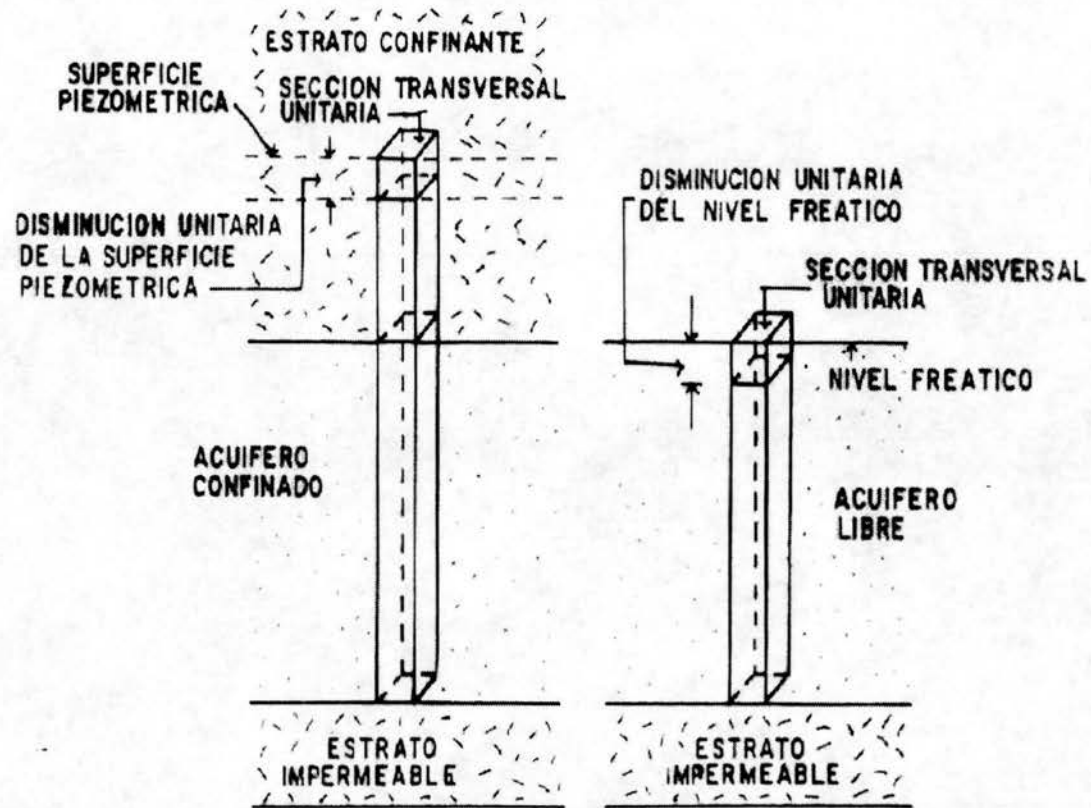


Figura 1.9 Definición del coeficiente de almacenamiento

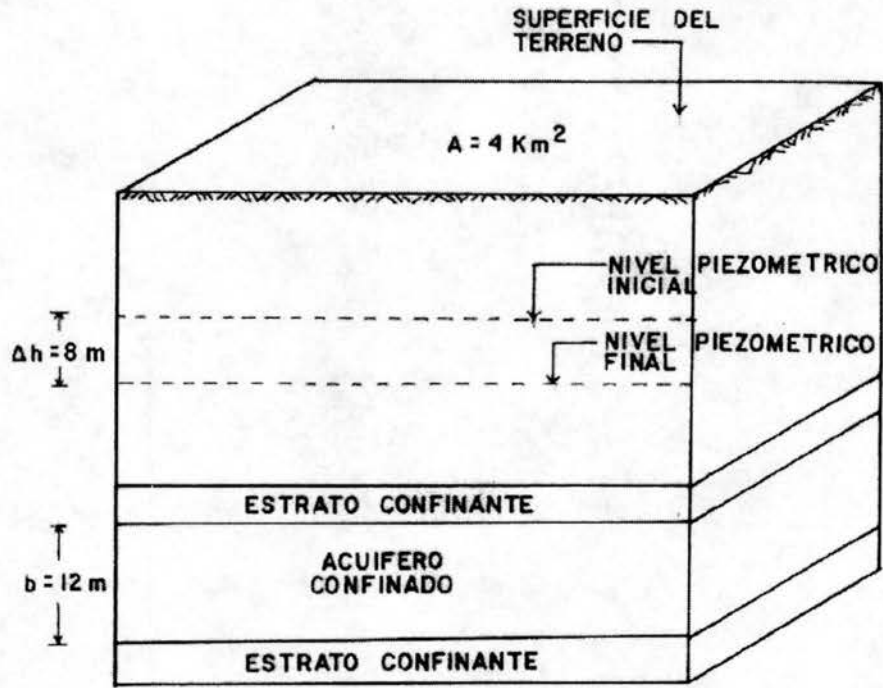


Figura 1.10 Ejemplificación del coeficiente de almacenamiento

$$S = \frac{Vd}{Vt} = \frac{Vd}{A \times \Delta h} = \frac{33,600 \text{ m}^3}{4 \text{ Km}^2 \times 8 \text{ m}} = \frac{33,600 \text{ m}^3}{32 \times 10^6 \text{ m}^3} = 1.05 \times 10^{-3}$$

El almacenamiento específico es igual a :

$$S_s = \frac{S}{b} = \frac{1.05 \times 10^{-3}}{12 \text{ m}} = 8.75 \times 10^{-5} / \text{m}$$

Rangos aproximados del coeficiente de almacenamiento por tipo de acuífero:

Acuíferos libres	0.05-0.30
Acuíferos confinados	0.00001-0.001

1.3.3 CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA Y TRANSMISIVIDAD

Conductividad Hidráulica (K).- También conocido como coeficiente de permeabilidad, se define como la capacidad que tiene una roca o suelo para permitir la circulación de agua a través de él. Numéricamente se define como el caudal que circula a través de una área unitaria, transversal al flujo, bajo un gradiente hidráulico unitario, se expresa en unidades de velocidad, en el sistema métrico generalmente en m/seg. o cm/seg.

En geohidrología la conductividad hidráulica tiene una gran importancia, ya que de ésta dependen propiedades fundamentales del agua subterránea, tales como el rendimiento de los aprovechamientos hidráulicos subterráneos, la velocidad de circulación tanto de posibles contaminantes como de la misma agua en el subsuelo, así como para cuantificar los caudales del flujo subterráneo.

Fue Henri Darcy quien en 1856 estudió en forma experimental el flujo en un medio poroso, estableciendo la ley que lleva su nombre. La Ley de Darcy establece que la velocidad de descarga de un fluido (agua) por un material poroso es directamente proporcional a la pérdida de carga hidráulica e inversamente proporcional a la longitud recorrida, o lo que es lo mismo, directamente proporcional al gradiente hidráulico. Matemáticamente puede expresarse de la siguiente manera:

$V \sim \Delta h$, $V \sim 1/l$, por lo tanto

$$V = Ki$$

Donde:

$$i = \frac{\Delta h}{l} = \text{Gradiente Hidráulico (adimensional)}$$

K = Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica (unidades de velocidad)

Esta velocidad (V) de Darcy, es aparente, ya que no es la velocidad real del movimiento del agua a través de los poros, debido a que se obtiene de la ecuación de continuidad como:

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

Siendo (A) el área total transversal al flujo, sin descontar el área ocupada por las partículas sólidas.

La figura No. 1.11 esquematiza la Ley de Darcy.

Sustituyendo la velocidad de Darcy en la ecuación de continuidad, se tiene

$$Q = AKi$$

De la expresión anterior se explica el por qué la permeabilidad es el caudal descargado a través de una sección de área unitaria, transversal al flujo, bajo un gradiente hidráulico unitario.

El valor de la conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad depende, por un lado de las características físicas del medio y por otro de algunas características del fluido. Por lo que si se consideran dichas características se tiene:

$$K = k \cdot \frac{\gamma}{\mu}$$

Donde:

K = Conductividad hidráulica

k = Permeabilidad intrínseca (depende de las características del medio poroso)

γ = Peso específico del fluido

μ = Viscosidad dinámica del fluido

Además la permeabilidad intrínseca (k) se puede expresar en función de una longitud característica conocida como "Radio Hidráulico" del medio, la cual se expresa en la forma siguiente:

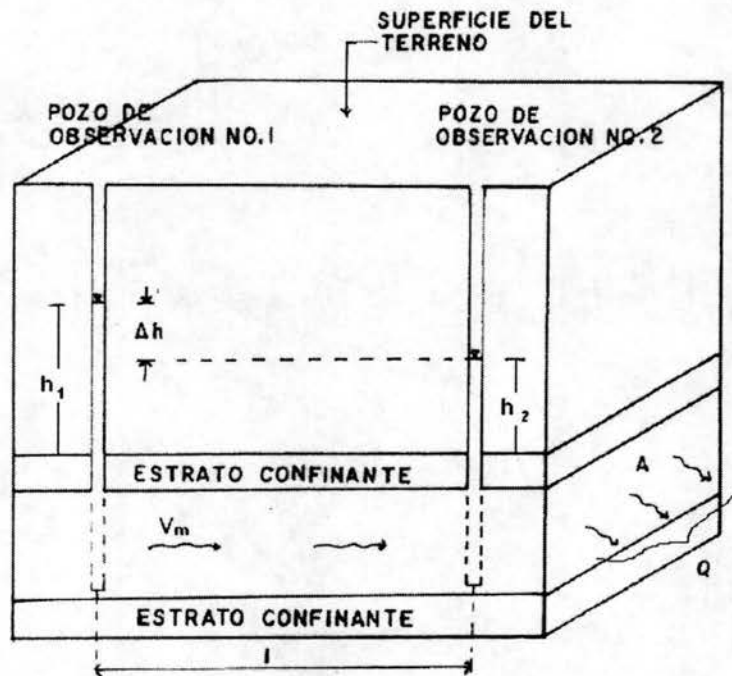
$$k = Cd^2$$

Donde:

C = factor de forma del medio poroso analizado

d = diámetro efectivo (d_{10}) obtenido de un análisis granulométrico de una muestra de suelo o roca

El factor de forma "C" toma en cuenta, la forma y acomodo de los granos, grado de compactación o cementación, presencia de fisuras, etc.



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

$$V = K i$$

Donde:

V = velocidad aparente de Darcy

K = conductividad hidráulica

$$i = \text{gradiente hidráulico} = \frac{\Delta h}{l}$$

Δh = pérdida de carga hidráulica entre dos pozos

l = distancia entre dos pozos

V_m = velocidad media real del movimiento del agua subterránea = l/t

t = tiempo de recorrido de una gota de agua entre los dos pozos

La relación entre la velocidad aparente de Darcy y media real se obtiene a través de la porosidad como

$$V_m = \frac{V}{n}$$

n = porosidad efectiva o simplemente porosidad

Además si

$$Q = A V$$

Q = gasto de descarga

A = área total transversal al flujo (sin descontar las partículas sólidas)

Sustituyendo "V"

$$Q = A K i$$

Figura 1.11 Definición de la conductividad hidráulica.

Para que una roca o suelo sea considerada como un acuífero no basta que tenga gran cantidad de agua almacenada, además tiene que permitir la circulación dentro de ella para su explotación, esto último lo define la conductividad hidráulica.

En la tabla 1.2 se presentan valores de K para diferentes suelos y rocas.

Tabla 1.2 Valores de la Conductividad Hidráulica (K)

Roca o suelo	K (m/seg.)
Arcilla	10^{-10} a 2×10^{-7}
Arena	10^{-5} a 3×10^{-4}
Grava	10^{-4} a 1.5×10^{-3}
Grava y arena	10^{-5} a 5×10^{-4}
Arenisca	10^{-8} a 5×10^{-6}
Caliza	muy variable

TRANSMISIVIDAD

Derivada de la conductividad hidráulica, al asociarle el espesor del acuífero se utiliza por comodidad en los cálculos del flujo subterráneo, principalmente en acuíferos confinados, el concepto de transmisividad.

La transmisividad (T).- Es la capacidad que tiene un acuífero de transmitir agua a través de todo su espesor, y se expresa por:

$$T = Kb$$

T = la transmisividad

K = conductividad hidráulica

b = espesor del acuífero

Adicionalmente se puede decir que la transmisividad es el caudal que circula a través de una franja vertical de espesor saturado del acuífero y de ancho unitario, bajo un gradiente hidráulico unitario.

Como ejemplo, de la figura No. 1.12 se desea obtener la transmisividad del acuífero confinado:



Figura 1.12 Ejemplo para la obtención de la transmisividad

$$T = 9 \times 10^{-5} \text{ m/seg} \times 20\text{m} = 0.0018 \text{ m}^2/\text{seg}$$

Los valores de la transmisividad están en el rango de poco menos de 0.50 a más de 500 m² /hr.

DETERMINACION DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA

El valor de la conductividad hidráulica puede ser obtenido por diversos métodos clasificados en tres grupos: a) por fórmulas empíricas, b) por mediciones en laboratorio, c) por pruebas de campo.

a) Por medio de fórmulas empíricas de conductividad hidráulica

A pesar de que se han hecho numerosos intentos por relacionar las características del medio poroso con la conductividad hidráulica, las ecuaciones con las que se cuenta deben tomarse con ciertas reservas y considerar que su resultado nunca podrá reemplazar a los obtenidos mediante otros métodos más precisos de campo como los que se mencionan más adelante.

Casi la totalidad de los métodos para obtener el valor de la conductividad hidráulica se basan en la ecuación de Allen Hazen, la cual es la siguiente:

$$K = CD_{10}^2$$

Donde K es la conductividad hidráulica, D₁₀ es el diámetro efectivo obtenido de la gráfica granulométrica del suelo en cuestión y C es un coeficiente cuyo valor varía entre 41 y 146. La ecuación de Hazen es válida para arenas en el rango de: 0.1 mm < D₁₀ < 3.0 mm y coeficiente de uniformidad Cu < 5.

La siguiente ecuación de Schlichter incluye la influencia de la temperatura "t" en el agua y la compacidad del medio "c":

$$K = 771 \frac{D_{10}^2}{c} (0.7 + 0.03t) \quad (\text{cm/seg})$$

Donde c es función de la porosidad n. Los valores de c se presentan en la tabla 1.3.

Tabla 1.3. Valores de "c"

n=0.26	0.38	0.46
c=83.40	24.1	12.80

Terzaghi, propone para suelos arenosos la siguiente expresión:

$$K = C_1 D_{10}^2 (0.7 + 0.03t) \quad (\text{cm/seg})$$

$$C_1 = C_0 \left(\frac{n - 0.13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right)^2$$

En donde C_0 es un coeficiente cuyos valores se indican en la siguiente tabla 1.4.

Tabla 1.4 Valores de C_0

Arenas de granos redondeados	$C_0=800$
Arenas de granos angulosos	$C_0=460$
Arenas con limos	$C_0 < 400$

Por ejemplo, en una muestra de 60 gr de arena de granos angulosos cuya porosidad es de 26%, se somete a un análisis granulométrico y se obtiene un diámetro efectivo de 1.5 mm, se desea obtener la conductividad hidráulica para agua circulando a 20°C utilizando la ecuación de Terzaghi.

$$C_1 = 460 \left(\frac{0.26 - 0.13}{\sqrt[3]{1 - 0.26}} \right)^2 = 9.5$$

$$K = 9.50(0.15)^2 [0.70 + 0.30(20)] = 0.277 \text{ cm/seg}$$

b) Por medio de mediciones de laboratorio, la valuación de la conductividad hidráulica en el laboratorio se realiza por medio de permeámetros, éstos pueden ser de carga constante y de carga variable. En el caso de que se utilicen permeámetros de carga constante, la conductividad hidráulica se calcula con la siguiente expresión:

$$K = \frac{VL}{Ath}$$

Donde:

K = Conductividad hidráulica (cm/s)

V = Volumen del agua captado en el tiempo "t" (cm³)

A = Área transversal de la muestra (cm²)

L = Longitud de la muestra (cm)

h = Pérdida de carga hidráulica constante (cm)

t = Tiempo de captación del volumen de agua (seg)

Los permeámetros de carga constante se utilizan en suelos granulares de textura gruesa y media que no sean cohesivos, como gravas, arenas, etc., ya que en suelos finos poco permeables no se utilizan por el inconveniente de que el tiempo de prueba se hace tan largo que deja de ser práctico.

En la figura 1.13 se representan los permeámetros de carga variable y carga constante.

Ejemplo: Se desea obtener la conductividad hidráulica, mediante un permeámetro de carga constante de una muestra de arena de 40 cm^2 de área transversal y 20 cm de longitud. Utilizando una pérdida de carga hidráulica de 50 cm , se obtuvo un volumen filtrado de 115 cm^3 en 5 minutos.

Utilizando la fórmula:

$$K = \frac{VL}{Ath}$$

$$V = 115 \text{ cm}^3$$

$$L = 20 \text{ cm}$$

$$A = 40 \text{ cm}^2$$

$$t = 5 \text{ min.} = 300 \text{ seg.}$$

$$h = 50 \text{ cm}$$

Sustituyendo:

$$K = \frac{(115 \text{ cm}^3)(20 \text{ cm})}{(40 \text{ cm}^2)(300 \text{ seg})(50 \text{ cm})}$$

$$K = 3.8 \times 10^{-3} \text{ cm/seg}$$

Si se opta por permeámetros de carga variable, la expresión a utilizar es la siguiente:

$$K = 2.3 \frac{L a}{At} \log \frac{h_1}{h_2}$$

K = Conductividad hidráulica

L = Longitud de la muestra

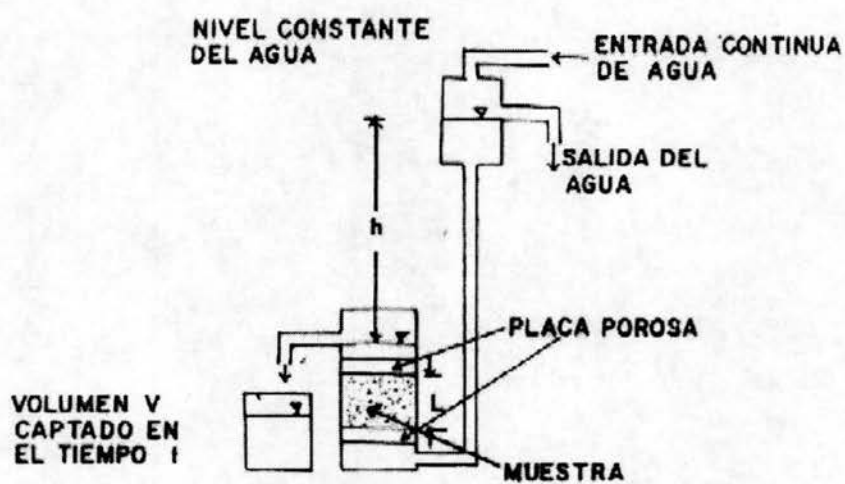
a = Área del tubo vertical de carga declinante

A = Área de la muestra transversal al flujo

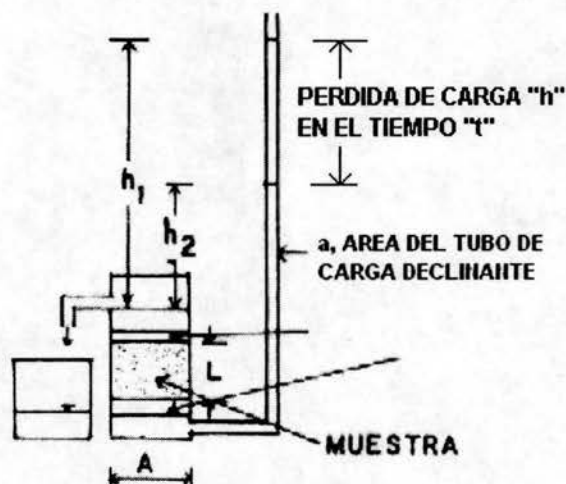
h_1 = Carga hidráulica al principio de la prueba

h_2 = Carga hidráulica al final de la prueba

t = Tiempo requerido para que la carga hidráulica pase de h_1 hasta h_2



(a)



(b)

Figura 1.13.a) Permeámetro de carga constante, b) Permeámetro de carga variable

Los permeámetros de carga variable se utilizan para suelos predominantemente de textura fina no plástica, como arenas limosas, arenas arcillosas, arenas finas, etc.

Ejemplo: Una muestra de suelo de 78.5 cm^2 de área transversal y 5 cm de espesor se probó en un permeámetro de carga variable. La carga hidráulica descendió de 50 cm a 45 cm en 4 min. 45 seg. El área del tubo vertical de carga declinante es 0.5 cm^2 . La permeabilidad se obtiene utilizando la siguiente ecuación:

$$K = 2.3 \frac{L a}{A t} \log \frac{h_1}{h_2}$$

$$L = 5 \text{ cm}$$

$$a = 0.5 \text{ cm}^2$$

$$A = 78.5 \text{ cm}^2$$

$$h_1 = 50 \text{ cm}$$

$$h_2 = 45 \text{ cm}$$

$$t = 4 \text{ min } 45 \text{ seg} = 285 \text{ seg.}$$

$$K = 2.3 \frac{(5\text{cm})(0.5\text{cm}^2)}{(78.5\text{cm}^2)(285\text{seg})} \log \frac{50\text{cm}}{45\text{cm}}$$

$$K = 1.2 \times 10^{-5} \text{ cm/seg}$$

c) Por medio de pruebas en campo.

La confiabilidad de las pruebas de laboratorio para determinar la conductividad hidráulica depende del grado de representatividad de las muestras, no se debe olvidar que en muchos casos es difícil obtener muestras que representen las condiciones del acuífero. Por lo tanto en proyectos en los que el conocimiento del valor de la conductividad hidráulica tenga gran importancia, se justifica su determinación por medio de pruebas en campo.

c.1) Un método de campo para valuar la conductividad hidráulica con mediciones en el campo es el empleo de **trazadores**. Un trazador es una sustancia fácilmente transportada por el agua subterránea a través del medio poroso. El método de trazadores se basa en el conocimiento de la velocidad media (V_m) de desplazamiento del trazador en el subsuelo, se puede utilizar la siguiente expresión:

$$K = n V_m \frac{\Delta L}{\Delta h}$$

Donde:

K = conductividad hidráulica

V_m = velocidad media del trazador en el agua subterránea

ΔL = longitud entre los puntos de observación

Δh = diferencia del nivel, piezométrico entre los puntos de observación

n = porosidad

Por ejemplo, se desea obtener la conductividad hidráulica haciendo uso de una sustancia trazadora, utilizando un pozo de inyección (No. 1) y un pozo de detección (No. 2) separados entre sí 5 m. Se aplica la sustancia trazadora en el pozo No. 1 y 1 hr. 30 min. después se detecta la aparición de ésta en el pozo No. 2. Adicionalmente se determina que el nivel piezométrico en los pozos 1 y 2 es de 18 m y 17.5 m respectivamente y la porosidad del suelo es de 31%; se obtiene que:

$$V_m = \frac{\Delta L}{t}$$

$$\Delta L = 5m$$

$$\Delta h = 18 - 17.5 = 0.5 m$$

$$t = 1 \text{ hr. } 30 \text{ min.} = 90 \text{ min.} = 5400 \text{ seg.}$$

$$V_m = \frac{5}{5400} = 0.00092 \text{ m/seg}$$

$$K = nV_m \frac{\Delta L}{\Delta h}$$

$$K = 0.31(0.00092 \text{ m/seg}) \frac{5m}{0.5m} = 0.00285 \text{ m/seg}$$

Este método es usado principalmente cuando el recorrido del agua es de algunos metros (se sugiere un rango de separación entre los pozos de 5 a 30 m), en un corto tiempo (en horas y menor a un día). Las sustancias trazadoras utilizadas son aquellas detectables ya sea por su coloración, por su composición química o por su radiación.

c.2) Pruebas de bombeo en régimen establecido (permanente)

Uno de los métodos más confiable para la determinación de la conductividad hidráulica en campo, es la prueba de bombeo en un pozo. Este método consiste en la extracción constante por bombeo de una cantidad de agua de un pozo que penetra hasta el fondo del acuífero; así como la medición de los niveles del agua en pozos de observación distantes en línea recta del pozo de bombeo. El bombeo se continúa hasta que se alcancen las condiciones de flujo establecido, el cual se logra cuando los niveles del agua en los pozos de bombeo y observación permanecen constantes con respecto al tiempo.

Es importante considerar que cualquier pozo que se someta a bombeo, queda rodeado por un cono de depresión, también llamado "cono de abatimientos", limitado por una distancia radial conocida como "radio de influencia" (R), a partir de la cual y más allá de este radio, la línea del nivel del agua

(freático o piezométrico) es horizontal y la carga hidráulica permanece constante y se representa por "H", lo anterior se esquematiza en la figura 1.14. El tamaño y forma de este cono depende del caudal de extracción, la duración del bombeo, las características del acuífero, de la inclinación de la superficie freática y de la recarga que tenga lugar dentro de la zona de influencia del pozo. La figura 1.15 muestra cómo afecta la transmisividad a la forma de dicho cono. Se puede observar que en una formación de transmisividad baja, el cono es profundo y de base pequeña, con una pendiente de sus lados muy pronunciada. Por el contrario en un acuífero con transmisividad alta, el cono es poco profundo y con una amplia base, se observa que la pendiente de sus lados es moderada. El conocimiento del comportamiento del cono de depresión es un factor importante en el diseño de pozos, ya que éste indica la posición del nivel dinámico, con el cual se determina, tanto la profundidad a la que se puede colocar la bomba, como el límite superior del ademe ranurado o rejilla. En el caso de la colocación de la bomba es evidente que ésta no puede estar por encima del nivel del agua y en lo que se refiere a la rejilla, si parte de ésta queda expuesta al aire (por encima del nivel dinámico), se provocan serios problemas de incrustación.

El análisis de los resultados de una prueba de bombeo depende de si el acuífero es confinado o libre.

La ecuación básica en régimen establecido para acuíferos confinados es la desarrollada por Thiem, (fig. 1.14a):

$$H - h_w = \frac{Q}{2\pi K b} \ln\left(\frac{R}{r_w}\right)$$

donde:

H = carga hidráulica total al nivel estático

h_w = carga hidráulica del nivel dinámico del pozo de bombeo

Q = caudal de bombeo

K = conductividad hidráulica

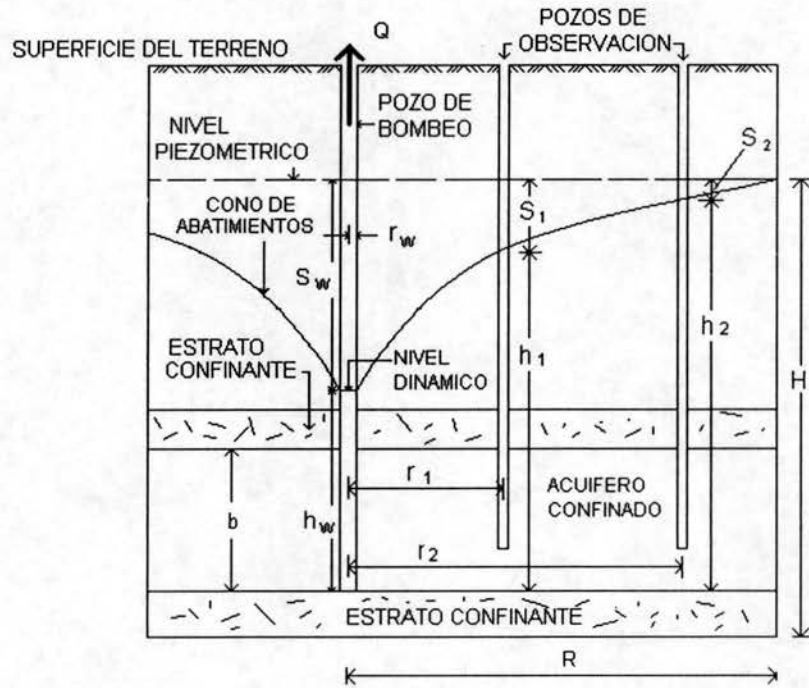
b = espesor saturado del acuífero

R = radio de influencia del cono de abatimientos (descensos)

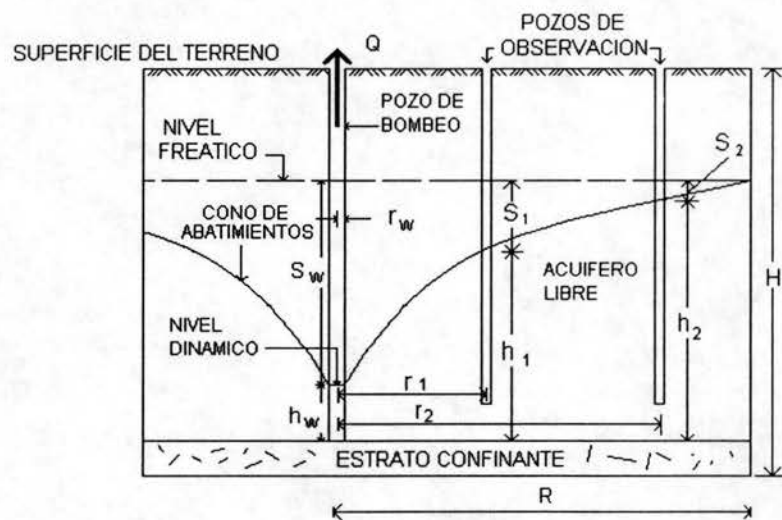
r_w = radio del pozo de bombeo

s_w = abatimiento en el pozo de bombeo = H- h_w

$\pi = 3.14159...$

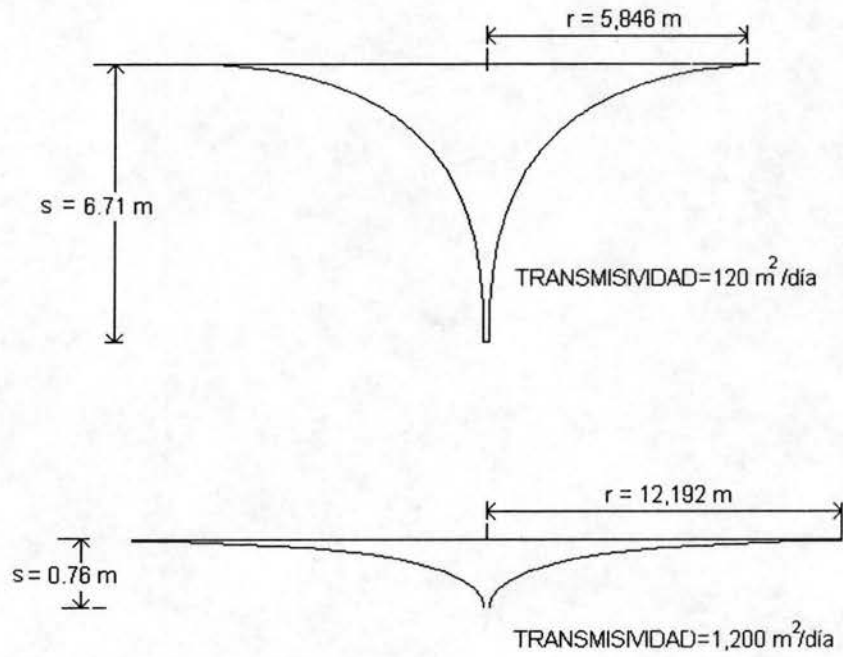


(a)



(b)

Figura 1.14 Variables que intervienen en la determinación de la conductividad hidráulica mediante la prueba de bombeo en flujo establecido, a) en un acuífero confinado, b) en un acuífero libre.



s = ABATIMIENTO O DESCENSO DEL NIVEL DEL AGUA

r = DISTANCIA DE UN POZO DE BOMBEO A UN POZO DE OBSERVACION
TAMBIEN PUEDE SER EL RADIO DE INFLUENCIA DEL CONO DE
ABATIMIENTOS "R".

Figura 1.15 Influencia de la transmisividad en la forma del cono de depresión.

Para la obtención de la conductividad hidráulica en acuíferos confinados, utilizando dos pozos de observación se aplica la ecuación de Thiem:

$$K = \frac{Q \ln(r_2/r_1)}{2\pi b(h_2 - h_1)}$$

donde:

h_1 y h_2 = cargas hidráulicas en los pozos de observación 1 y 2, respectivamente.

r_1 y r_2 = distancias del pozo de bombeo a los pozos de observación 1 y 2, respectivamente. Estas distancias se miden entre los ejes de cada pozo.

A continuación se presenta un ejemplo para la determinación de la conductividad hidráulica, mediante una prueba de bombeo en un acuífero confinado:

Un pozo bombea agua de un acuífero confinado. Dos pozos de observación son ubicados, uno a 100 m y el otro a 1000 m de distancia con respecto al pozo de bombeo. Se bombea un gasto de 0.2 m³/min. Los abatimientos observados en régimen estable (permanente) en los pozos de observación fueron de 8 m y 2 m. En la figura 1.16a se muestra el arreglo de los pozos. Determinar:

- La conductividad hidráulica y la transmisividad si el acuífero es de 20 m de espesor.
- El abatimiento en el pozo de bombeo, que tiene un diámetro de 30 cm.
- Si se duplica el diámetro del pozo de bombeo (b), ¿En qué porcentaje se incrementa el gasto de bombeo? Considerar que el radio de influencia es de 300 m y que la conductividad hidráulica (o transmisividad) y el abatimiento del nivel del agua en el pozo de bombeo permanecen constantes.

- obtención de la conductividad hidráulica y la transmisividad.

Datos:

$$Q = 0.2 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$b = 20 \text{ m}$$

$$r_1 = 100 \text{ m}$$

$$r_2 = 1000 \text{ m}$$

$$s_1 = 8 \text{ m}$$

$$s_2 = 2 \text{ m}$$

Aplicando la ecuación para acuíferos confinados :

$$h_2 - h_1 = \frac{Q}{2\pi K b} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

Si $h_1 = H - s_1$, $h_2 = H - s_2$, entonces:

$$h_2 - h_1 = s_1 - s_2, \text{ por lo tanto:}$$

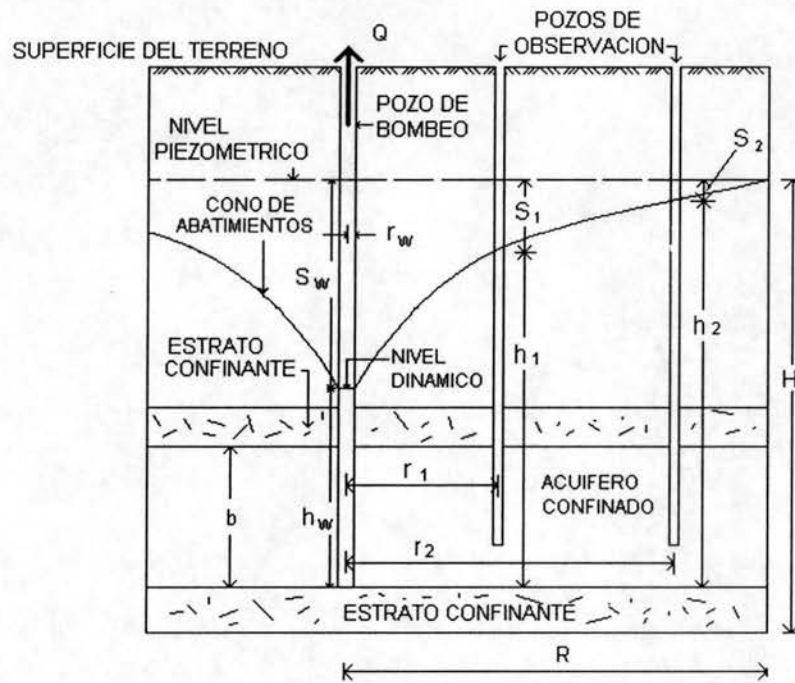


Figura 1.16a Valores obtenidos de una prueba de bombeo en un acuífero confinado, una vez que se ha alcanzado el equilibrio del nivel dinámico en un flujo establecido.

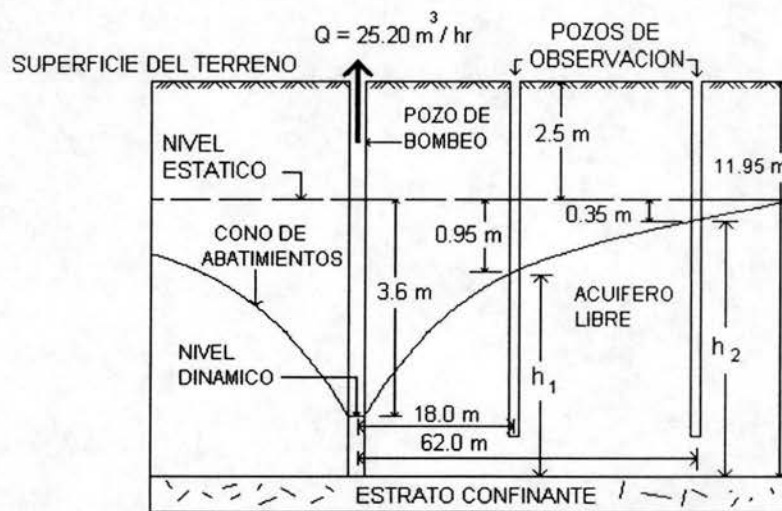


Figura 1.16b Valores obtenidos de una prueba de bombeo en un acuífero libre, una vez que se ha alcanzado el equilibrio del nivel dinámico en flujo establecido.

$$s_1 - s_2 = \frac{Q}{2\pi K b} \operatorname{Ln} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$$

Despejando K

$$K = \frac{Q}{2\pi b (s_1 - s_2)} \operatorname{Ln} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$$

$$K = \frac{0.20 \text{ m}^3/\text{min}}{2(3.1416)(20\text{m})(8\text{m} - 2\text{m})} \operatorname{Ln} \left(\frac{1000\text{m}}{100\text{m}} \right)$$

$$K = 6.11 \times 10^{-4} \text{ m/min}$$

Para el cálculo de la transmisividad se utiliza la siguiente ecuación:

$$T = Kb$$

$$T = 6.11 \times 10^{-4} \text{ m/min} \times 20 \text{ m}$$

$$T = 0.0122 \text{ m}^2/\text{min}$$

b) para obtener el abatimiento en el pozo de bombeo se tiene:

$$D = 0.30 \text{ m}$$

$$r_w = D/2 = 0.15 \text{ m}$$

Utilizando la siguiente ecuación:

$$s_w = \frac{Q}{2\pi K b} \operatorname{Ln} \left(\frac{r_j}{r_w} \right) + s_j$$

$$K = 6.11 \times 10^{-4} \text{ m/min}$$

$$b = 20 \text{ m}$$

$$r_j = 100$$

$$s_j = 8 \text{ m}$$

$$s_w = \frac{0.2 \text{ m}^3/\text{min}}{2(3.1416)(6.11 \times 10^{-4} \text{ m/min})(20\text{m})} \operatorname{Ln} \left(\frac{100\text{m}}{0.15\text{m}} \right) + 8\text{m}$$

$$s_w = 24.94 \text{ m}$$

c) Si se duplica el diámetro del pozo de bombeo se tiene:

$$D_2 = 2D = 0.60 \text{ m}$$

$$r_{2w} = D_2/2 = 0.30 \text{ m}$$

El porcentaje de incremento del caudal de bombeo se obtiene con la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{2\pi K b (H - h_w)}{\ln\left(\frac{R}{r_w}\right)}$$

$$Q_2 = \frac{2\pi K b (H - h_{2w})}{\ln\left(\frac{R}{r_{2w}}\right)}$$

si $h_{2w} = h_w$

$$\frac{Q}{Q_2} = \frac{\ln\left(\frac{R}{r_{2w}}\right)}{\ln\left(\frac{R}{r_w}\right)}$$

$$\frac{Q}{Q_2} = \frac{\ln\left(\frac{300m}{0.30m}\right)}{\ln\left(\frac{300m}{0.15m}\right)} = \frac{6.9078}{7.6009} = 0.9088 = \text{Factor}$$

Finalmente utilizando la siguiente ecuación se obtiene el porcentaje de incremento del caudal en el pozo de bombeo:

$$\Delta Q(\%) = \frac{Q_{2rw} - Q_{rw}}{Q_{rw}} = (\text{Factor} - 1)100$$

$$\Delta Q = (0.9088 - 1)100 = 9.12\%$$

como puede observarse el incrementar al doble el diámetro del pozo de bombeo solo incrementa el gasto en un 9.12%, por lo que resulta antieconómico aumentar el diámetro del pozo de extracción, ya que se obtiene un rendimiento del pozo menor al 10%.

La ecuación básica en régimen establecido para acuíferos libres es la desarrollada por Dupuit, (fig 1.14b):

$$H^2 - h_w^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln\left(\frac{R}{r_w}\right)$$

donde las variables tienen el mismo significado que la ecuación básica de Thiem.

Para el caso de un acuífero libre, utilizando dos pozos de observación, la conductividad hidráulica se obtiene por medio de la ecuación de Dupuit:

$$K = \frac{Q \ln(r_2/r_1)}{\pi (h_2^2 - h_1^2)}$$

donde las variables tienen el mismo significado que para acuíferos confinados y se muestran en la figura 1.14 b.

A continuación se presenta un ejemplo para la determinación de la conductividad hidráulica, mediante una prueba de bombeo en un acuífero libre. En la figura 1.16b se muestra el arreglo del pozo de bombeo y de los pozos de observación, así mismo se indican las dimensiones más relevantes. La condición de flujo establecido se alcanzó con un gasto de bombeo de 25.2m³/hr. Los abatimientos obtenidos fueron los siguientes:

En el pozo de bombeo: $s_w = 3.6$ m.

En el pozo de observación no. 1: $s_1 = 0.95$ m.

En el pozo de observación no. 2: $s_2 = 0.35$ m.

Con estos datos se calculan h_1 y h_2 .

$$h_1 = 11.95 - 2.5 - 0.95 = 8.5 \text{ m.}$$

$$h_2 = 11.95 - 2.5 - 0.35 = 9.10 \text{ m.}$$

Además :

$$Q = 25.20 \text{ m}^3/\text{hr.} = 0.007 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

Aplicando la ecuación para acuífero libre:

$$K = \frac{Q \ln(r_2/r_1)}{\pi (h_2^2 - h_1^2)} = K = \frac{0.007 \text{ m}^3/\text{seg} \ln(62\text{m}/18\text{m})}{3.1406 [(9.10\text{m})^2 - (8.50\text{m})^2]}$$

$$K = 2.6 \times 10^{-4} \text{ m/seg.}$$

Aún cuando las ecuaciones de Thiem y Dupuit son aplicables a algunos casos prácticos, tienen dos limitaciones principales: 1) no proporcionan ninguna información respecto al coeficiente de almacenamiento del acuífero, y 2) no permiten calcular la variación de los abatimientos en el tiempo. Además, no son aplicables al estudio de acuíferos semiconfinados, ni a pozos de bombeo con penetración parcial del espesor del acuífero., ni a muchos otros que se presentan con frecuencia en la práctica. Por otra parte, su aplicación requiere de dos pozos de observación, próximos al de bombeo, lo cual no siempre es económicamente posible, especialmente cuando el acuífero se encuentra profundo o es de gran espesor.

c.3) Pruebas de bombeo en régimen no establecido (transitorio)

Anteriormente se hizo una descripción del método de las pruebas de bombeo en régimen establecido para determinar la conductividad hidráulica y la transmisividad de un acuífero.

Ahora se describirán las pruebas de bombeo en régimen de flujo no establecido, también conocido como régimen transitorio.

Mediante la utilización de las pruebas de bombeo en régimen transitorio se puede obtener, entre otras cosas, la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento y se pueden predecir los abatimientos futuros en un acuífero producto de la extracción de un caudal determinado, lo cual es un factor importante para el diseño adecuado de un pozo profundo.

La prueba consiste en extraer un caudal constante de un pozo, de bombeo, y a ciertos intervalos de tiempo tomar la lectura de los niveles del agua, tanto en el pozo de bombeo como en los pozos de observación.

Se recomienda que se tenga la mayor cantidad de pozos de observación, pero si por razones de orden económico esto no es posible, se debe contar cuando menos con uno de ellos.

En la prueba de bombeo en régimen transitorio, se pueden obtener los coeficientes hidráulicos y predecir los abatimientos, sin esperar a que se alcance el régimen establecido, lo cual es una ventaja, ya que el equilibrio del flujo se puede dar en unas cuantas horas o en varios días e incluso no darse este régimen. Es evidente que el no esperar a que el flujo se equilibre durante la prueba reduce el costo de la misma.

c.3.1) Prueba de bombeo transitorio en acuíferos confinados

Una vez realizada la prueba de bombeo, mediante la utilización de la ecuación de C. V. Theis se puede interpretar dicha prueba. En su forma más sencilla la ecuación de Theis es la siguiente:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \text{ -----(1)}$$

s = abatimiento (descenso) del nivel del agua, en metros, en cualquier punto de la vecindad de un pozo que se esté bombeando a caudal constante.

Q = caudal de bombeo, en m³/hr.

T = coeficiente de transmisividad, en m²/hr.

$\pi = 3.14159...$

$$W(u) = \text{función de pozo} = -5772 - \log_e u + u - \frac{u^2}{2 \times 2!} + \frac{u^3}{3 \times 3!} - \dots$$

además:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \text{-----(2)}$$

En la expresión anterior los términos significan:

r = distancia, en metros, desde el centro del pozo de bombeo al punto en el que se mide el abatimiento, que es el centro de un pozo de observación o piezómetro.

S = coeficiente de almacenamiento, adimensional.

T = transmisividad.

t = tiempo transcurrido desde que se inicia el bombeo.

La derivación de la ecuación de Theis se basa en las siguientes suposiciones:

- El acuífero es homogéneo e isótropo.
- El espesor de acuífero es constante.
- El acuífero tiene expansión lateral infinita
- El caudal bombeado procede del almacenamiento del acuífero
- El pozo es totalmente penetrante
- El acuífero libera agua instantáneamente al abatirse la superficie piezométrica.

Las suposiciones anteriores pareciera que limitan la aplicación de la ecuación de Theis, pero en realidad esto no es así, ya que si bien es cierto que las condiciones naturales difieren de las condiciones teóricas, en muchos casos, tales desviaciones no son significativas desde el punto de vista práctico. No obstante cuando las condiciones reales difieren notablemente de las hipótesis establecidas, los resultados obtenidos dejan de tener validez.

Cabe aclarar que no es posible la obtención directa de "T" y "S" con el empleo de las expresiones (1) y (2), sin embargo, el mismo Theis desarrolló un método gráfico-numérico para la obtención de estos parámetros, el cual consiste en los pasos siguientes:

- Trazar la curva tipo $W(u)-1/u$ en papel con trazado doble logarítmico. En la figura 1.17 se presenta esta gráfica tipo.
- Construir la gráfica abatimiento-tiempo del pozo de observación en papel que tenga las mismas características que el inciso (a), con la misma escala.

CURVA TIPO DE THEIS PARA INTERPRETACION DE PRUEBAS DE BOMBEO EN POZOS TOTALMENTE PENETRANTES
EN ACUIFEROS CONFINADOS

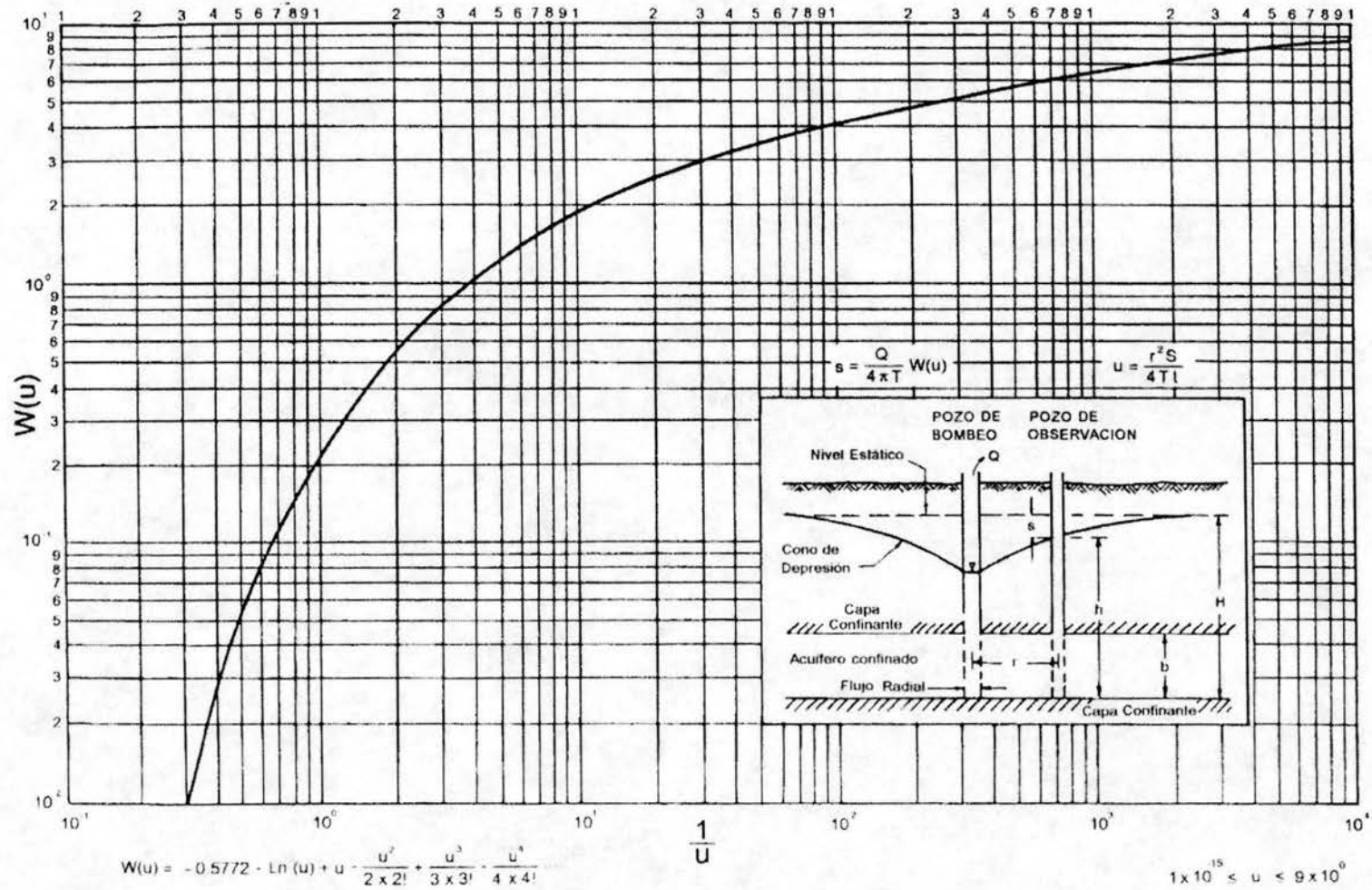


Figura 1.17 Curva tipo para interpretación de pruebas de bombeo en régimen transitorio en pozos totalmente penetrados, en acuíferos confinados.

- c) Superponer las gráficas, manteniendo los ejes paralelos y buscar la coincidencia de la curva de la prueba con la curva tipo, por lo menos en una porción de ésta.
- d) Seleccionar un punto cualquiera en la región de las curvas superpuestas (punto de ajuste) y obtener sus coordenadas en sus cuatro ejes, esto es: $W(u)$ y $1/u$ en la curva tipo y "s" y "t" en la curva de campo. Es conveniente que el punto de ajuste se escoja de modo que las coordenadas en la curva tipo ($W(u), 1/u$) se conozcan de antemano, por ejemplo $W(u) = 1$ y $1/u = 1$ ya que esto simplifica el cálculo.
- e) Sustituir los valores de las coordenadas del punto de ajuste en las ecuaciones (1) y (2) y despejar los valores de "T" y "S"

Un método más sencillo para la interpretación de las pruebas de bombeo en régimen transitorio fue desarrollado por Cooper y Jacob, quienes llegan a la conclusión de que para tiempos largos ($t > 5 S r^2 / T$), la ecuación de no equilibrio de Theis puede simplificarse, sin cometer gran error cuando $u < 0.01$, por la siguiente expresión:

$$s = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S}$$

Donde, obviamente el significado de las variables es el mismo que en la ecuación de Theis.

A partir de esta ecuación, Cooper y Jacob desarrollaron el método gráfico de interpretación que lleva sus nombres y que consiste en lo siguiente:

- a) Construir la gráfica tiempo-abatimiento en escala semilogarítmica, el tiempo se traza en la escala logarítmica horizontal y el abatimiento se ubica en la escala aritmética vertical.
- b) Pasar una recta por los puntos que se alinean y determinar su pendiente. Los puntos correspondientes a los primeros minutos, por lo general se apartan de la línea recta, debido a que corresponden a tiempos cortos ($t < 5 r^2 S / T$), para los cuales no es válida la ecuación de Cooper y Jacob.

- c) La transmisividad se obtiene mediante la siguiente expresión.

$$T = \frac{0.183Q}{\Delta s}$$

en la cual:

T = transmisividad, en m^2/s .

Q = descarga del pozo de bombeo, en m^3 /s .

Δs = pendiente de la recta, que se expresa como la diferencia de abatimientos en un ciclo logarítmico de tiempo, en metros.

d) Determinar el valor de $t=t_0$, para el cual la prolongación de la recta de ajuste interseca la línea de abatimiento nulo ($s = 0$).

e) El coeficiente de almacenamiento se calcula mediante la siguiente expresión:

$$S = \frac{2.25Tt_0}{r^2}$$

Donde las variables fueron definidas anteriormente.

Además, el gráfico tiempo-abatimiento de Cooper-Jacob proporciona un medio para la predicción de abatimientos futuros, ya que basta con prolongar el trazo de la línea recta, y para cualquier tiempo de esa prolongación conocer el abatimiento.

Para el caso de acuíferos semiconfinados o libres, se sigue un procedimiento análogo con ecuaciones parecidas a las de Theis y Cooper-Jacob.

La tabla 1.5 muestra algunos datos obtenidos en una prueba de bombeo. Los valores de abatimiento fueron medidos en un pozo de observación situado a 100 m del pozo de bombeo, del cual se extrajo un caudal constante de 100 lts./seg.

abatimiento "s" (m)	tiempo "t" (min)
0.02	1.2
0.05	2
0.14	4
0.35	8
0.55	15
0.81	30
0.2	60
1.15	65
1.55	120
1.75	250
2.2	470
2.25	940

Tabla 1.5 abatimientos obtenidos, en distintos lapsos de tiempo, durante una prueba de bombeo.

En base a estos datos tabulados, se realizan los siguientes ejemplos de aplicación de los métodos de Theis y Cooper-Jacob, los cuales se presentan en las figuras 1.18 y 1.19.

METODO DE THEIS

INTERPRETACION DE UNA PRUEBA DE BOMBEO

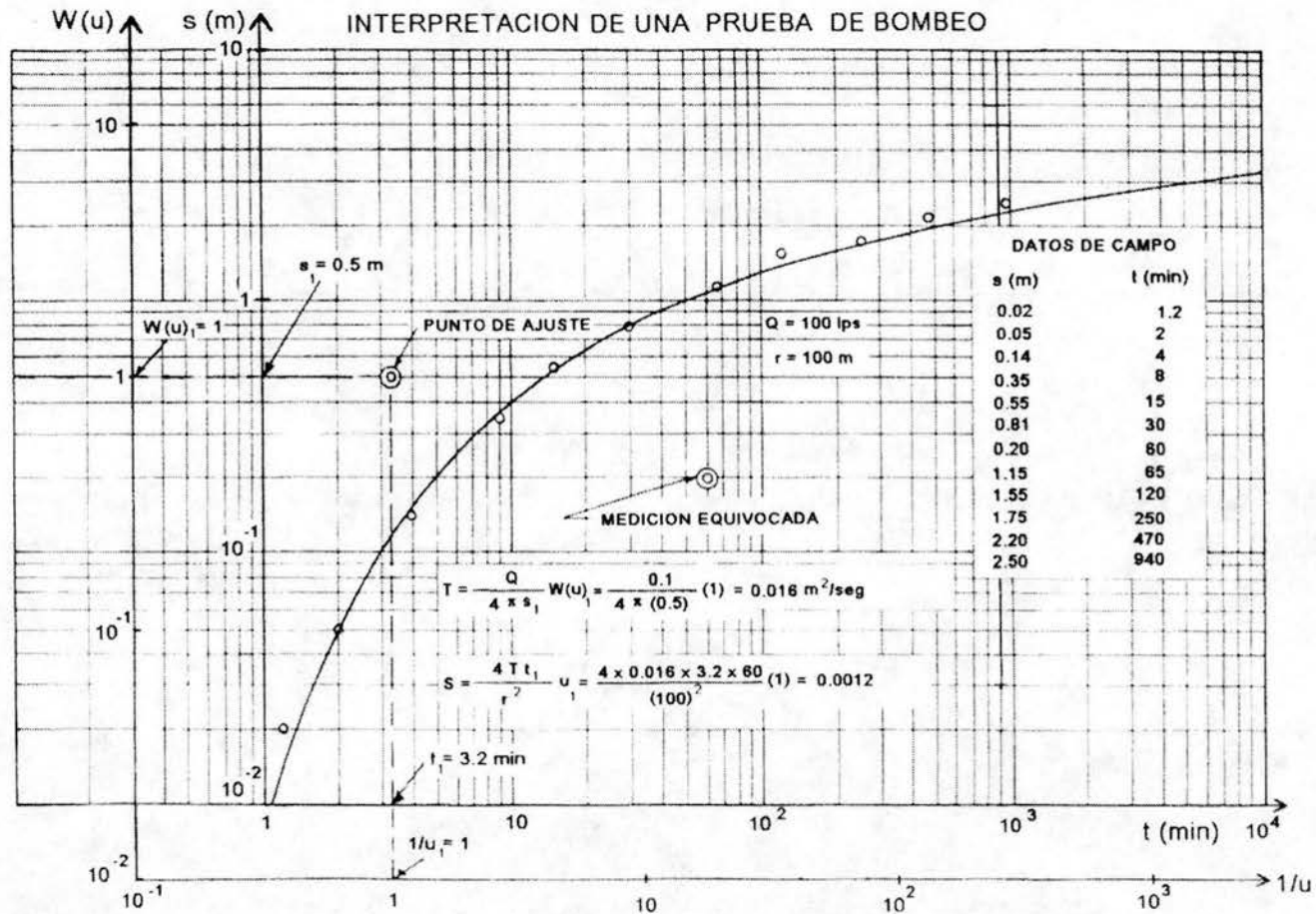


Figura 1.18 Ejemplo de la obtención de la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento, utilizando el método gráfico-numérico de Theis.

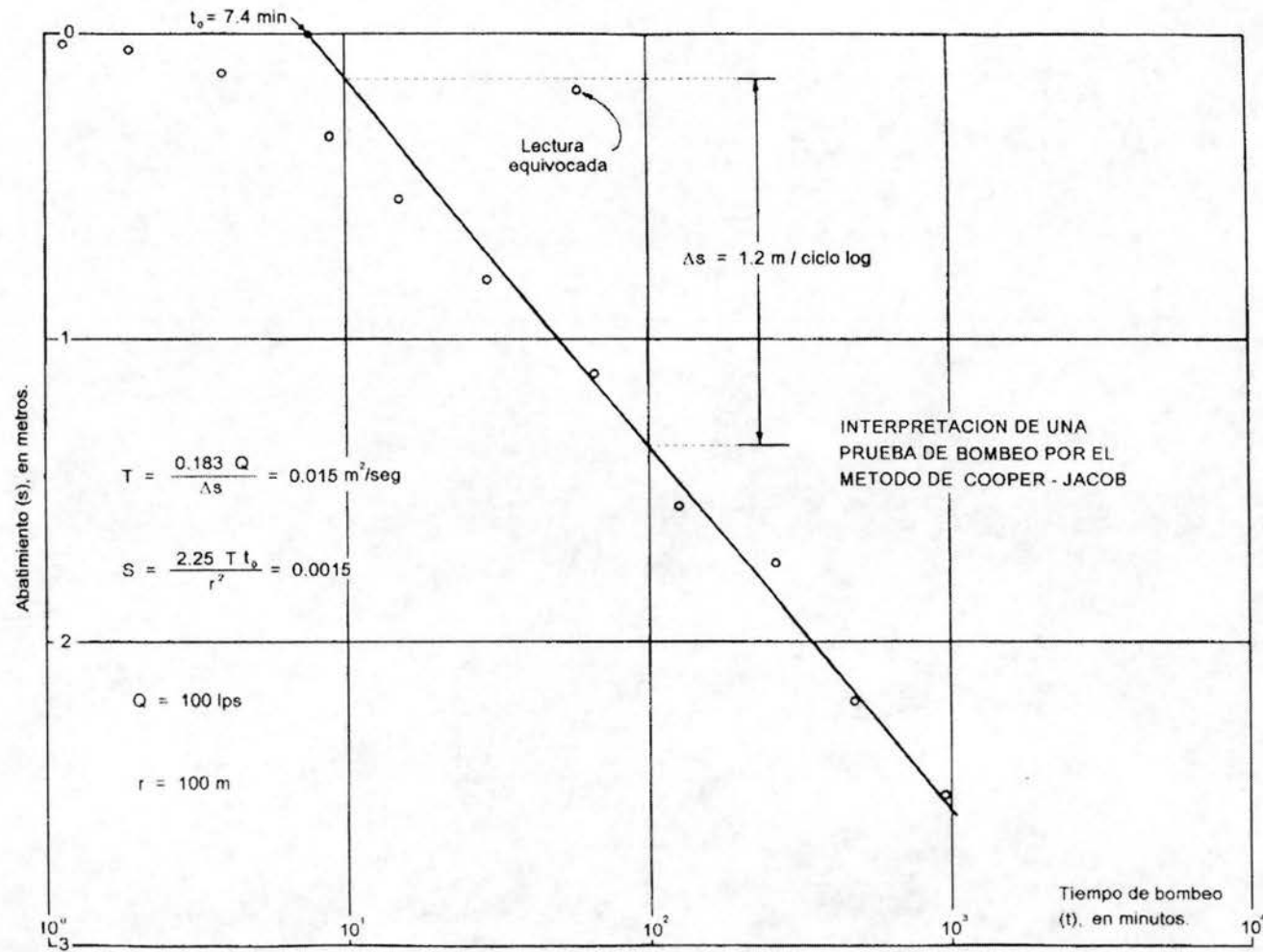


Figura 1.19 Ejemplo de la obtención de la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento, utilizando el método de Cooper-Jacob

CAPITULO 2. DISEÑO DE POZOS PROFUNDOS

2.1 ELEMENTOS QUE FORMAN UN APROVECHAMIENTO HIDRAULICO SUBTERRANEO

Como ya se mencionó anteriormente existen diversos aprovechamientos hidráulicos subterráneos, pero en este trabajo se tratará únicamente lo relacionado con los pozos profundos.

Se puede definir a un pozo profundo como una obra cuyas características constructivas son el resultado de una serie de estudios y del desarrollo de distintas actividades, necesarias para realizar una oradación vertical a través del subsuelo, la cual mediante los aditamentos necesarios, sea utilizada para la extracción de agua subterránea.

Se puede considerar que un pozo está formado básicamente por dos elementos: uno de ellos es aquél donde se aloja el equipo de bombeo y además sirve como conducto por donde fluye el agua subterránea hasta la entrada de la bomba, a la cual se le conoce como **zona ademada o cámara de bombeo**. El otro elemento es la denominada **zona de captación**, que es por donde penetra el agua del acuífero. Cada uno de estos elementos consta de diferentes partes, las cuales se mencionan a continuación:

I.- Zona ademada

- a) Área cementada
- b) Contra ademe
- c) Ademe liso

II.- Zona de captación

- d) Ademe ranurado o rejilla
- e) Filtro de grava
- f) Tapón de fondo

La figura 2.1 muestra los diferentes elementos de un pozo profundo

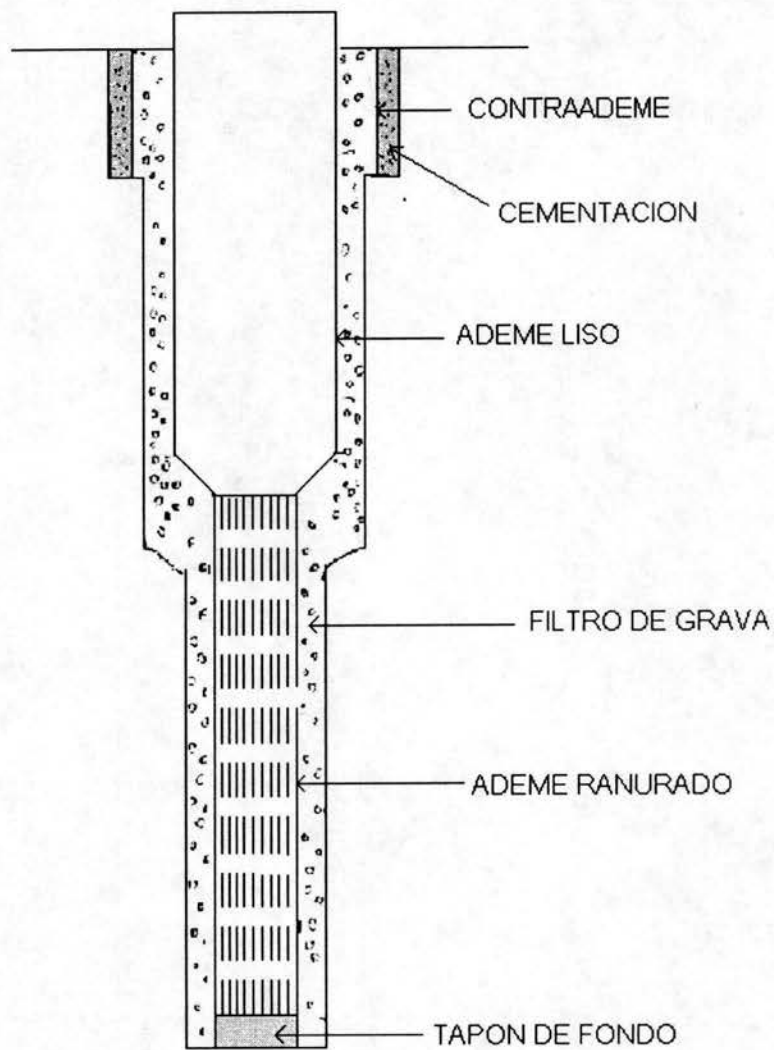


Figura 2.1 Elementos que forman un pozo profundo para la explotación de agua subterránea

2.2 ESTUDIOS DE HIDROLOGIA SUBTERRANEA

La hidrología subterránea estudia el comportamiento de los acuíferos ante las acciones conjuntas de recarga y explotación, con la finalidad de hacer un uso racional del agua subterránea. Debido a su complejidad, en el estudio de la hidrología subterránea intervienen diversas disciplinas científicas y técnicas.

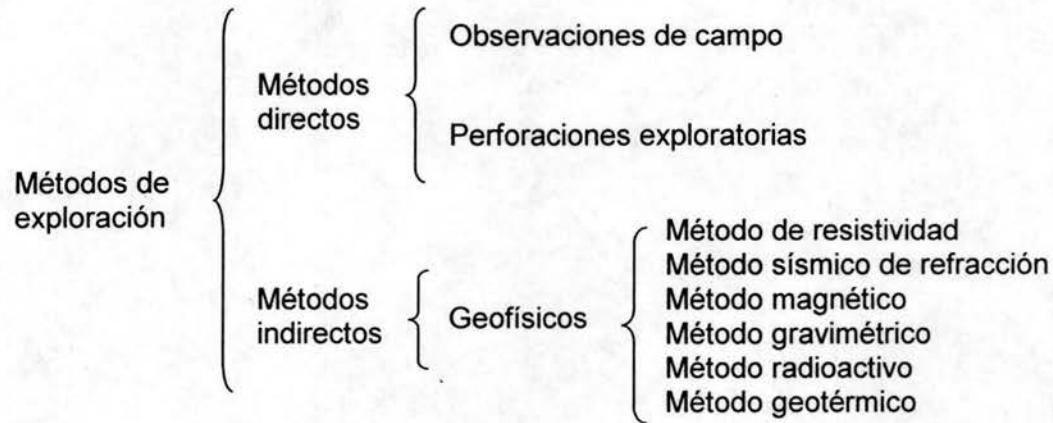
Hoy en día es necesario hacer un uso eficiente de todos los recursos y el agua no es la excepción, por lo que es imprescindible que previamente a la explotación del agua subterránea se tenga conocimiento pleno de la cantidad, distribución y calidad de la misma, a fin de evitar que los aprovechamientos hidráulicos subterráneos sean abandonados prematuramente a consecuencia de efectos adversos, como costos excesivos de bombeo debido a grandes abatimientos del nivel dinámico, hundimiento del terreno que afecte a los servicios y a las edificaciones, y en el caso de zonas costeras el efecto de la intrusión salina.

No se debe olvidar que si bien es cierto que el agua subterránea es un recurso renovable, su explotación tiene ciertas limitantes.

En forma general podemos decir que el agua de lluvia puede seguir tres caminos: puede evaporarse y volver a formar nubes, puede formar escurrimientos superficiales, los cuales, finalmente terminarán en algún lago, laguna o en el mar; el tercer destino de la precipitación pluvial es infiltrarse en el subsuelo y formar parte de un acuífero. Es evidente que esta agua infiltrada es la que nos interesa encontrar.

Es muy importante destacar que no basta con saber que existe agua en el subsuelo, sino que además es necesario conocer si es susceptible de explotación, es decir, debemos saber si se puede extraer una cantidad aceptable, su profundidad, su calidad química, etc.

Para realizar una prospección geohidrológica se cuenta con dos tipos de métodos de exploración: métodos directos y métodos indirectos



1.- Métodos directos

a) Observación de campo.

Se puede afirmar que el agua subterránea existe casi en cualquier parte bajo la superficie terrestre, esto lo sabían perfectamente los constructores de pozos petroleros, ya que en sus perforaciones posiblemente no hubiese petróleo, pero era casi seguro que el agua subterránea sí estaría presente. Sin embargo, al ingeniero especialista en geohidrología le interesa saber dónde se localiza el agua subterránea en cantidades suficientes, y en condiciones favorables para que su explotación resulte económica. Para lograr lo anterior se sirve de conocimientos técnicos, de datos recabados durante la perforación de pozos en la zona de estudio y de su sentido común.

Existen indicios que podrían darnos una primera idea de la factibilidad de explotación de cierta zona, por ejemplo: en zonas áridas cierto tipo de vegetación nos indica que el agua se encuentra a poca profundidad; de igual manera, la posibilidad de localizar un acuífero aumenta, cuando existen cuerpos de agua superficiales de tipo perennes.

En forma general la metodología que se realiza en una observación de campo es la siguiente:

Se tendrán que realizar estudios de las condiciones hidrológicas existentes, ya que de éstas depende en gran medida, la productividad de un acuífero, así mismo se deberá elaborar un plano geológico en el cual se muestren los diferentes tipos de rocas que afloran en la superficie, así como cortes litológicos que muestren la composición del subsuelo.

Debe anexarse una interpretación que nos indique cuáles rocas son probables productoras de agua, así como su ubicación.

Al iniciar una prospección geohidrológica debemos considerar lo siguiente:

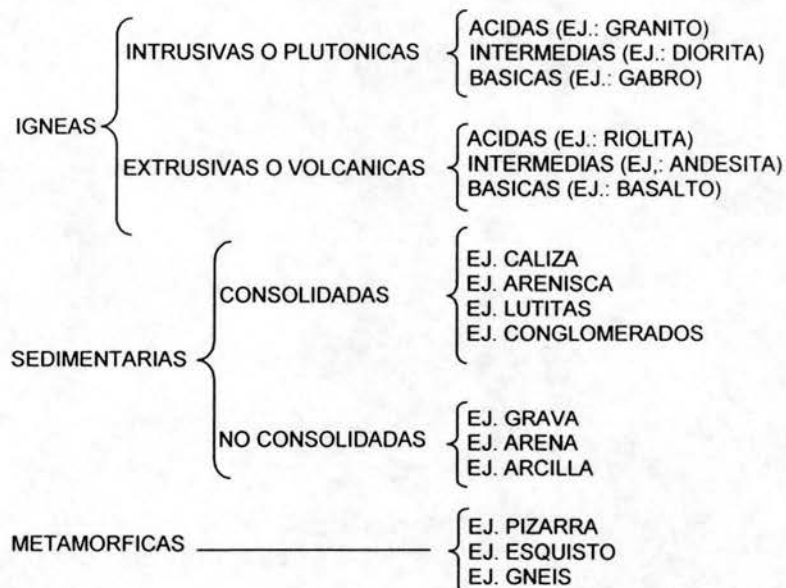
De todas las rocas existentes, sólo a cuatro podemos considerar como favorables para que pueda darse en ellas un acuífero, las cuales son:

- a) Gravas
- b) Arenas
- c) Basalto
- d) Calizas.

Las gravas y las arenas son rocas sedimentarias no consolidadas. El basalto es una roca ígnea básica, las calizas son rocas sedimentarias formadas principalmente por carbonato de calcio.

Posteriormente debe realizarse una recopilación prolija de la información existente acerca de los pozos perforados en la zona. Esta información es primordial, de tal suerte que de no existir pozos en la zona y si las condiciones económicas lo permiten, se deberán perforar uno o más pozos de exploración

A continuación se describe una clasificación general de las rocas:



b) Perforaciones exploratorias

La manera más segura de conocer el tipo de formaciones que se encuentran por debajo de la superficie terrestre, es perforando a través de ellas. Por esto las inferencias que se deriven de los

estudios anteriores, en cuanto a la presencia de agua subterránea y probables tipos de acuíferos deberán verificarse mediante perforaciones exploratorias. Estas consisten en hacer perforaciones de 4 a 4 ½ " de diámetro, con brocas de diamante, con o sin muestreo de núcleos. Mediante estas perforaciones se obtienen datos de mucha importancia como los siguientes:

- a) Columna litológica
- b) Nivel estático del agua
- c) Calidad del agua
- d) Una idea sobre las posibilidades productoras de la formación acuífera
- e) Registro eléctrico que mide las resistividades de las formaciones atravesadas en la perforación

Cabe destacar, que toda perforación para un pozo de explotación, debe de utilizarse en sus primeras etapas como pozos de exploración.

2.- Métodos indirectos. (Métodos Geofísicos)

La característica principal de estos métodos es que desde la superficie se realiza la medición de ciertos parámetros físicos (resistividad, elasticidad, etc.), mediante los cuales se infieren ciertas condiciones del subsuelo.

Los métodos geofísicos constituyen, en términos generales, una herramienta útil para extender a toda un área, los datos geológicos obtenidos en unas cuantas perforaciones de exploración dentro de esa misma área; con el consecuente ahorro económico. Para tal fin el geofísico mide desde la superficie del terreno determinadas anomalías físicas presente en el subsuelo, las cuales interpreta en términos de la geología profunda.

Los datos así obtenidos se correlacionan con los cortes litológicos obtenidos de perforaciones exploratorias.

De todos los métodos geofísicos antes mencionados, los más comúnmente utilizados en la prospección de agua subterránea son el método eléctrico y el método sísmico.

Es importante aclarar que los métodos geofísicos se basan en el hecho de que las diferentes rocas, reaccionan de diferente manera ante ciertos factores externos, como por ejemplo, las fuerzas eléctricas y las fuerzas elásticas de una onda sísmica, de tal suerte que al reconocer estas reacciones podemos inferir ciertas propiedades de las rocas, tales como: permeabilidad, porosidad, etc.

2.3 DISEÑO DE LOS ELEMENTOS QUE FORMAN UN POZO

El diseño de un pozo profundo consiste en lograr la óptima combinación de su costo inicial de construcción, un comportamiento que genere los menores costos de operación y mantenimiento y una larga vida útil. Para conseguir esta combinación es necesario escoger los factores dimensionales y los materiales adecuados para su construcción.

Cabe mencionar que el diseño del pozo debe basarse, por un lado, en las características del acuífero a fin de obtener el mayor rendimiento posible y la mayor eficiencia y por otro en la cantidad de agua necesaria para satisfacer la demanda. El ignorar el primer punto nos lleva a sub-explotar o sobre-explotar un acuífero y el no atender el segundo nos lleva a subdimensionar o sobredimensionar los elementos que forman un pozo.

Es necesario tomar conciencia que el costo que genera un adecuado diseño de pozos, indudablemente, será recompensado en cierto plazo con el eficiente funcionamiento del mismo.

El diseño de un pozo va más allá de decidir la profundidad y el diámetro del mismo. Un verdadero diseño debe incluir el tipo de perforación a usarse, la información que debe recopilar el perforador, así mismo debe especificar las características del ademe, las de la estructura de admisión del agua subterránea, la protección sanitaria que se necesita, además deberá considerar el desarrollo del pozo, la prueba del mismo y el procedimiento de desinfección.

Otro aspecto a considerar en el diseño del pozo es lo referente a la resistencia mecánica de la tubería lisa y ranurada, la cual no será tratada en este trabajo.

En este capítulo se trata el diseño de pozos ademados y por tanto con rejilla, propios de formaciones no consolidadas. Los pozos perforados en formaciones rocosas estables, los cuales no requieren ademe ni rejilla, son de diseño más simple, por lo tanto los criterios expuestos en este capítulo son válidos para este segundo caso.

Por otro lado, se distinguen dos tipos de pozos, los primeros son los de desarrollo natural, que son aquellos en los que el ademe está en contacto con la formación, este tipo de pozos se construyen muy poco en México, sin embargo ofrecen ventajas que en muchos casos los tornan muy convenientes. El segundo tipo de pozos son los que tienen filtro de grava, que es el que comúnmente se construye en nuestro país.

2.3.1 DETERMINACION DE LA PROFUNDIDAD

La determinación de la profundidad se basa en la estratigrafía de la zona, la cual se obtiene de la correlación de los resultados obtenidos mediante los estudios de hidrología subterránea, los resultados del registro eléctrico y los resultados granulométricos de las muestras obtenidas ya sea de perforaciones exploratorias o en la propia perforación exploratoria del pozo de producción.

Es conveniente que la perforación llegue al piso del acuífero o sea que atraviese todo el espesor del acuífero, ya que con esto se obtienen las siguientes ventajas:

- a) Se obtiene una mayor capacidad específica del pozo al utilizar todo el espesor del acuífero.
- b) Se dispone de mayor abatimiento del nivel del agua, con lo cual es posible obtener más de ésta.

La figura 2.2 muestra dos pozos, uno con penetración parcial y otro con penetración total.

Cabe aclarar que es necesario hacer un análisis para cada caso en particular, ya que posiblemente nuestras demandas de caudal nos permitan hacer una penetración parcial. Otro factor que influye en el diseño de la profundidad es la magnitud del espesor, ya que si este es muy grande su penetración total sería antieconómica. La presencia de estratos conteniendo agua de la calidad indeseable es otra limitante en la profundidad de un pozo.

2.3.2 OBTENCION DEL DIAMETRO DE LA PERFORACION

La elección del diámetro del pozo es una decisión muy importante, ya que al realizar la perforación, el costo de este trabajo, impacta en forma considerable el importe total de la obra.

Existen dos factores que se deben considerar para la elección del diámetro de la perforación:

Uno de ellos es que debe tener la amplitud necesaria para alojar la tubería de ademe, la que a su vez permitirá la instalación y funcionamiento de la bomba.

El segundo factor que debe considerarse, es que en la zona de captación, el diámetro de ésta debe garantizar la eficiencia hidráulica del aprovechamiento.

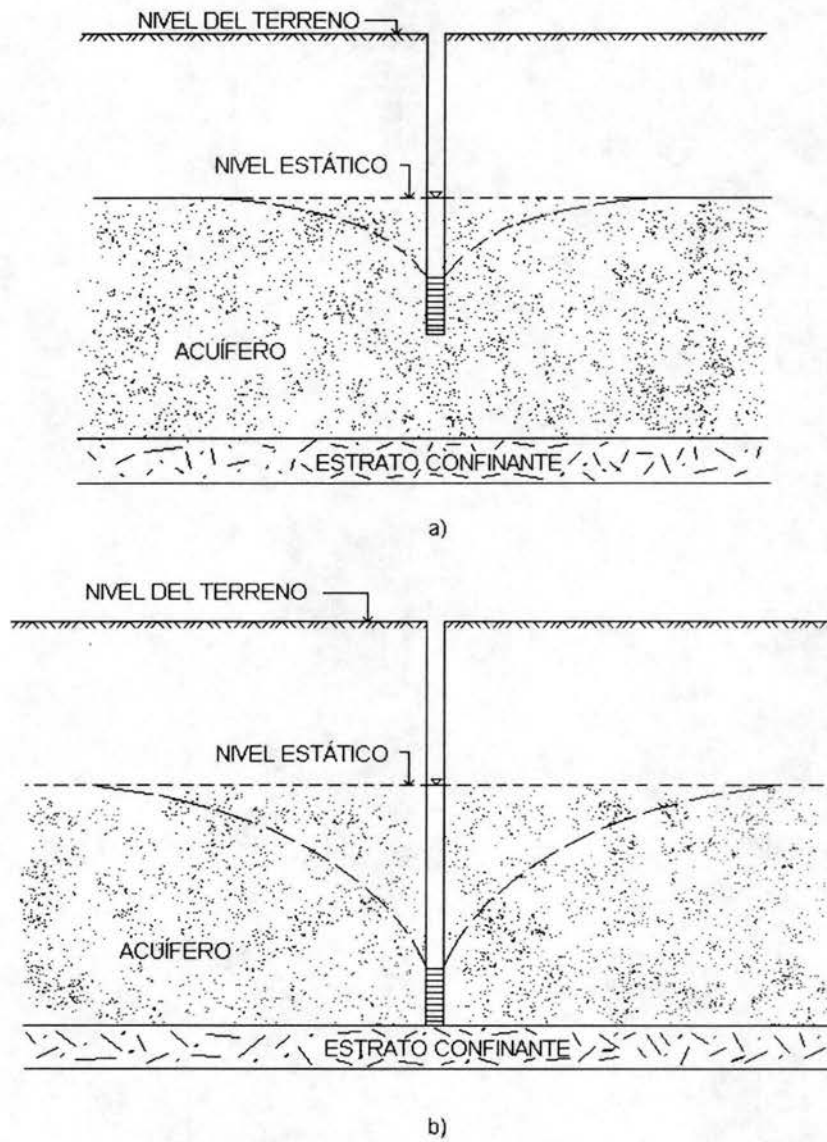


Figura 2.2 a) acuífero con penetración parcial, b) acuífero con penetración total

Más adelante se detalla el diseño del diámetro de la tubería de ademe y de la tubería ranurada.

En pozos poco profundos o en aquellos en los que el nivel de bombeo está cercano al fondo del pozo, por lo general se diseñan con un diámetro constante, en caso contrario resulta más económico reducir el diámetro unos metros debajo de la profundidad a la que se pretende colocar la bomba.

La figura 2.3 muestra un pozo de bombeo con sección constante y otro con sección variable.

Es importante mencionar que en caso de que sea necesario un filtro de gravas, se deberá considerar este espacio adicional para la determinación del diámetro de la perforación, el espacio necesario para dicho filtro se trata más adelante.

2.3.3 ZONAS POR CEMENTAR

Es recomendable la instalación de un tubo de mayor diámetro en la parte superior del pozo, llamado contraademe, el cual junto con la llamada cementación, evita que los acuíferos someros, posiblemente contaminados, entren en contacto con los profundos a explotar.

La cementación se coloca entre el contraademe y la pared de perforación. Mantiene fija a esta tubería ya que sobre ella se va a sostener la tubería de ademe durante su instalación para no apoyarla en el fondo. Lo anterior se esquematiza en la figura 2.4. Para la cementación se utiliza en realidad un concreto.

Es práctica común que la distancia entre el límite de la perforación y el contraademe sea del orden de 3 pulg., lo mismo que entre el contraademe y el ademe, pero no se debe olvidar en primer lugar, que estos espacios deben permitir la construcción correcta de la cementación y en segundo lugar la adecuada reposición del filtro de grava.

2.3.4 ELECCION DEL DIAMETRO DE LA TUBERIA DE ADEME

Es obvio que resulta más económico el reducir el diámetro de la perforación, y por tanto el diámetro del ademe, unos metros debajo del nivel al que se pretende colocar la bomba, por lo tanto se tratará por separado la elección del diámetro de la tubería lisa y la ranurada.

- a) Elección del diámetro de la tubería lisa (cámara de bombeo).

Existen diferentes criterios para seleccionar el diámetro del ademe liso, uno de ellos es el propuesto por la empresa Edward Johnson Inc. La cual recomienda que la tubería de ademe sea, por

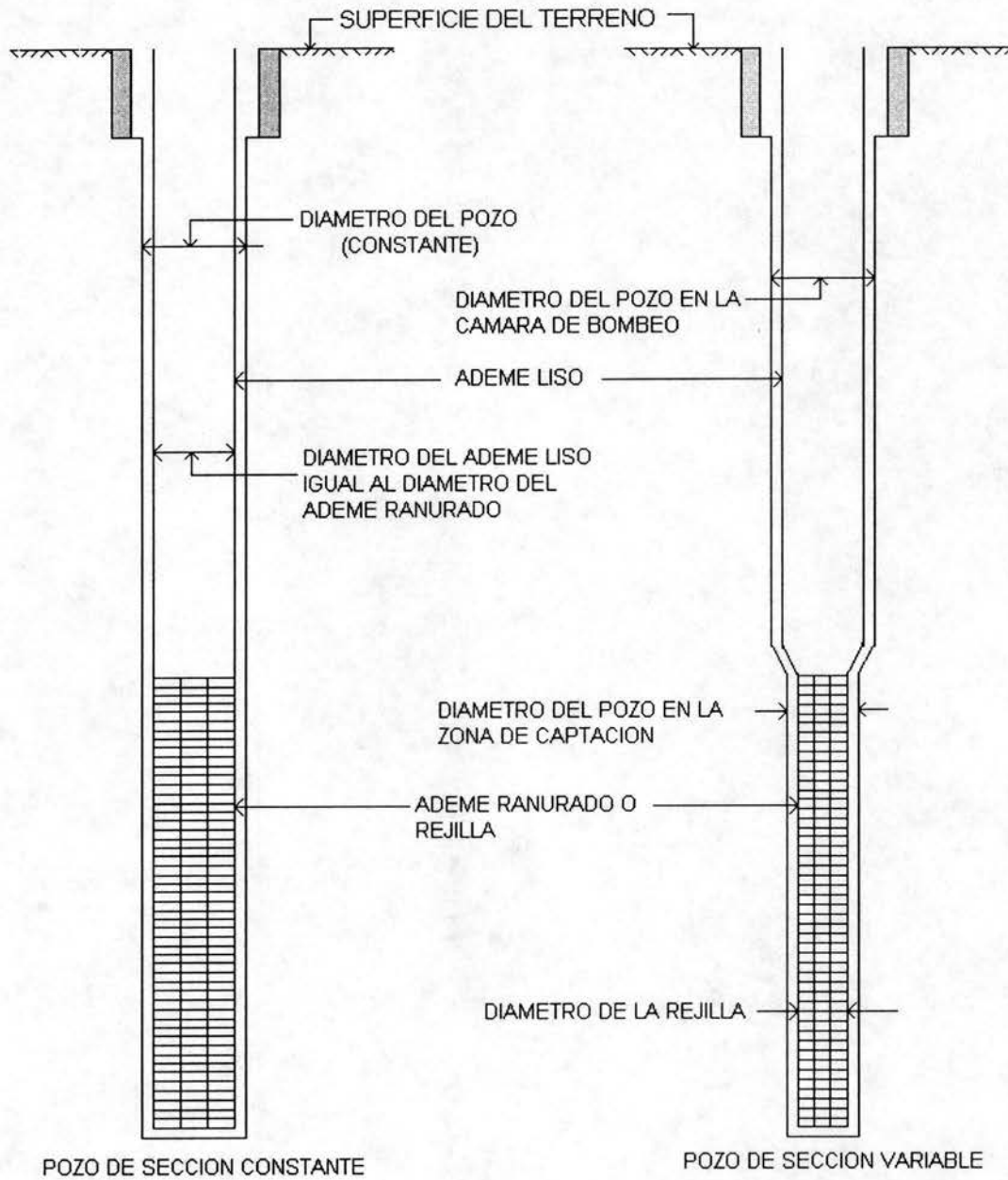


Figura 2.3 Pozos para explotación de agua subterránea de sección constante y sección variable

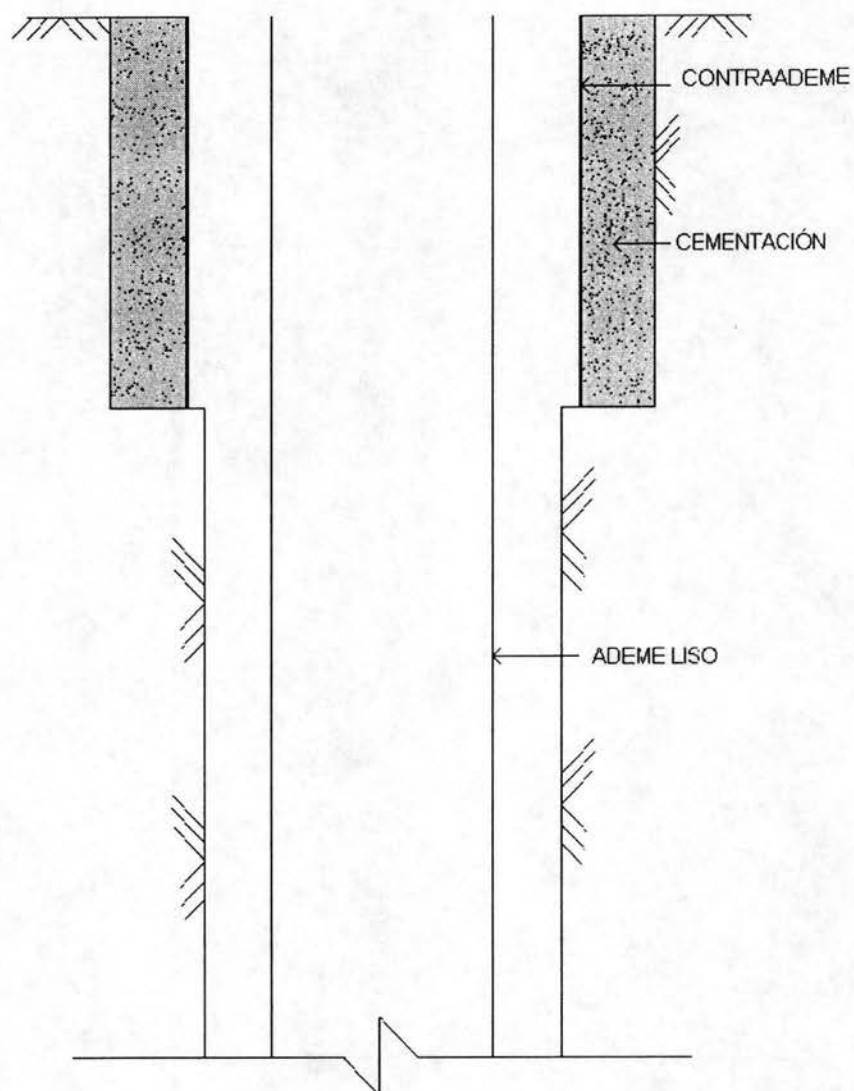


Figura 2.4 Esquema del contraedme y la cementación en un pozo profundo

lo menos dos números mayores que el diámetro nominal de la bomba y que nunca deberá elegirse un ademe cuyo diámetro sea menor a por lo menos un número más grande que los tazones de la bomba. La tabla 2.1 es la recomendada por Johnson para diferentes necesidades de producción. Otra recomendación es que el diámetro del ademe sea suficiente para asegurar que la velocidad de salida del agua del pozo sea igual o menor que 1.5 m/s, para evitar excesivas pérdidas de carga hidráulica en el sistema de bombeo.

DIÁMETROS RECOMENDADOS POR JOHNSON PARA ELECCIÓN DE ADEME

PRODUCCIÓN PREVISTA DEL POZO (M ³ /MIN)	DIÁMETRO NOMINAL DE LOS TAZONES DE LA BOMBA EN CM.	DIÁMETRO ÓPTIMO DEL ADEME DEL POZO EN CM.	DIÁMETRO MÍNIMO DE ADEME EN CM.
Menos que 0.4	10.0	15.0 ID	12.5 ID
0.3 a 0.7	12.5	20.0 ID	15.0 ID
0.6 a 1.5	15.0	25.0 ID	20.0 ID
1.3 a 2.5	20.0	30.0 ID	25.0 ID
2.3 a 3.4	25.0	35.0 OD	30.0 ID
3.2 a 5.0	30.0	40.0 OD	35.0 OD
4.5 a 6.8	35.0	50.0 OD	40.0 OD
6.0 a 12.0	40.0	60.0 OD	50.0 OD

ID = Diámetro Interior

OD = Diámetro Exterior

Tabla 2.1 diámetros de pozos en función del caudal producido y el diámetro de la bomba.

Otro criterio para la elección del diámetro de ademe liso es propuesto por la American Petroleum Institute (API), el cual se presenta en la tabla 2.2.

Diámetro de la perforación		Diámetro del ademe		Caudal	
Pulgadas	cm	Pulgadas	cm	lps	
24	610	20	508	Más de	100
20	508	16	406	Hasta	100
17 ½	445	13 3/8	340		60
12 ¼	311	9 5/8	244		30
8 ½	216	7	178		15
6 ½	159	5	127		5
4 ½	108	3	76	Menos de	5

Tabla 2.2 normas de entubado según la American Petroleum Institute (API)

b) Elección del diámetro de la tubería ranurada.

El diámetro de la rejilla se elige más que para obtener un mayor o menor gasto, su elección tiene por objeto limitar la velocidad de entrada del agua a través de la rejilla por debajo de cierto límite.

Para un determinado caudal la velocidad de entrada por la rejilla depende del área total de las aberturas de ésta, la que a su vez esta determinada por tres factores:

- 1.- Longitud de la rejilla.
- 2.- Tamaño de las aberturas de las ranuras.
- 3.- Diámetro de la rejilla.

La longitud de la rejilla, como se verá más adelante, depende del espesor del acuífero y el tamaño de la abertura de las ranuras de la rejilla lo determina la granulometría de la formación acuífera, por lo tanto, es el diámetro de ademe ranurado el que se puede aumentar o disminuir para lograr que la velocidad de acceso al pozo sea la deseada.

Johnson recomienda que la velocidad de entrada al pozo sea igual o menor a 3 cm/seg, con lo cual se logra que las pérdidas por fricción en la rejilla sean despreciables; así mismo, con este límite de velocidad se logra que los fenómenos indeseables de incrustación y la corrosión en el ademe y equipo de bombeo sean de efectos mínimos.

La velocidad de entrada del agua subterránea en la rejilla o ademe ranurado se obtiene de la ecuación de continuidad con la siguiente expresión:

$$V_e = \frac{Q}{A_R}$$

Donde:

V_e = Velocidad de acceso del agua subterránea a la rejilla o ademe ranurado

Q = Descarga deseada o gasto de bombeo del pozo

A_R = Área total abierta de las ranuras

Una vez calculada la velocidad de acceso, si ésta es superior a 3 cm/seg. se aumenta el diámetro para disminuir la velocidad, si por el contrario la velocidad está por debajo del límite de los 3 cm/seg. el diámetro se disminuye hasta un diámetro en el cual la velocidad de entrada del agua al pozo se aproxime a la recomendada.

En la figura 2.5 se muestran diferentes tipos de rejillas usadas en pozos.

c) Elección del material de la rejilla del pozo.

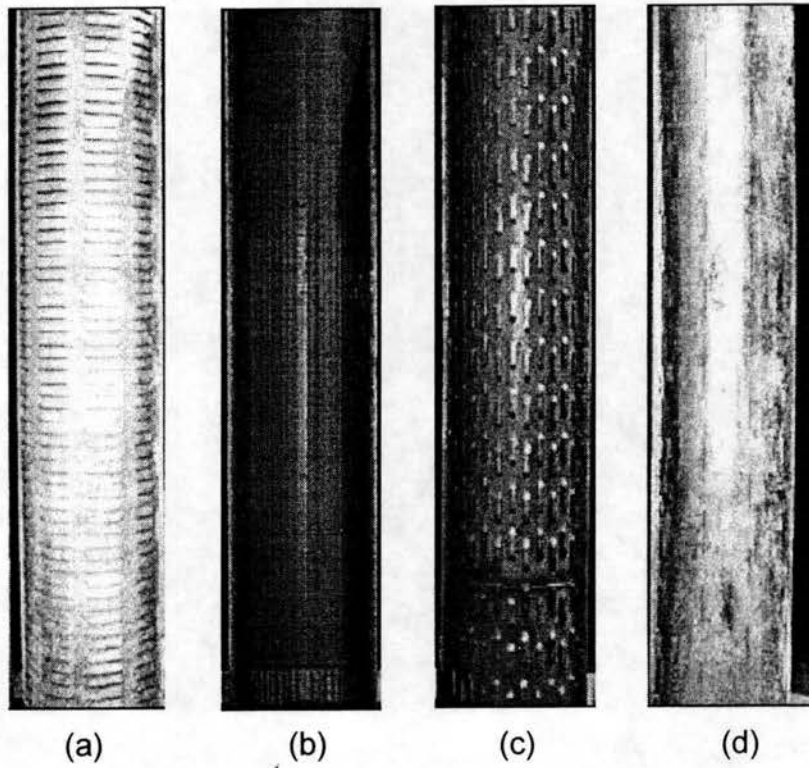
Tres cosas gobiernan la selección de un material metálico con el cual esta fabricada la rejilla:

1. El contenido mineral del agua.
2. La presencia de bacterias que forman un lodo gelatinoso.
3. Los requerimientos de resistencia mecánica de la rejilla.

El contenido mineral del agua subterránea es obtenido de análisis químicos en el laboratorio. Un análisis químico del agua subterránea puede revelar si esta es **corrosiva** o **incrustante**. En algunos casos, se pueden presentar ambas situaciones.

Agua corrosiva

La corrosión de la rejilla del pozo es más probable a ser una causa de falla del pozo que la corrosión del ademe. El aumento de las aberturas de la rejilla resultan de la remoción de solamente unas pocas milésimas de una pulgada de metal que puede permitir la entrada de una excesiva cantidad de arena al pozo.



- a) Tipo persiana
- b) De ranura continua
- c) Tipo canastilla
- d) Ranurada

Figura 2.5 Diferentes tipos de rejilla

Por otro lado, la corrosión podría remover de $\frac{1}{8}$ a $\frac{1}{4}$ de pulgada de la pared del ademe y todavía dejar bastante espesor de pared a prevenir el colapso del pozo o la entrada de agua indeseable. Esto es importante, por lo tanto, usar una rejilla de pozo fabricada de un material metálico resistente a la corrosión.

Agua incrustante

El agua incrustante tiende a depositar minerales en la superficie de la rejilla y en los poros de la formación justo en la parte externa de la rejilla. Tales depósitos o "costras" obstruyen las aberturas de la rejilla y de la formación acuífera.

A menudo se utilizan ácidos fuertes que pueden disolver las costras, debiendo tener la precaución de que el material de la rejilla sea resistente al ataque de los ácidos, tal y como si se hubiera seleccionado una rejilla de material resistente a la corrosión.

Las incrustaciones formadas por la precipitación de carbonatos de calcio y magnesio (descompuestos para formar carbonatos insolubles y dióxidos de carbono) son suaves y pueden ser removidas fácilmente por medio de ácidos y otros químicos. Las incrustaciones duras son formadas por sulfatos y silicatos de calcio y magnesio que son insolubles en ácidos u otros químicos y por lo tanto no pueden ser removidas.

La siguiente lista de criterios o indicadores de agua corrosiva o incrustante, puede ayudar al diseñador del pozo a reconocer la agresividad del agua hacia el material y equipo del pozo y sistema de bombeo, para poder seleccionar la resistencia requerida del material que asegure la duración fijada de la vida de servicio del pozo, (Raghunath, 1982; Driscoll, 1989):

Criterios de calidad del agua con efectos agresivos por los fenómenos de incrustación y corrosión en material y equipo de tipo metálico utilizado en pozos de extracción de agua subterránea,
(Raghunath, 1982; Driscoll, 1989)

(I) Aguas con una dureza (como carbonatos) mayor a 300 ppm pueden causar incrustaciones de tipo suave, por la depositación del carbonato de calcio (costras de cal).

(II) Aguas con una disolución de sulfatos mayor a 100 ppm o una disolución de silicatos mayor de 40 ppm pueden causar incrustaciones de tipo dura.

(III) Aguas con un pH menor a 7 son corrosivas y si el pH es mayor de 7.5 pueden ser incrustantes.

(IV) Aguas con una Conductividad Eléctrica mayor de 1500 $\mu\text{mhos/cm}$ pueden causar corrosión de hierro y acero.

(V) Presencia de CO_2 en el agua mayor de 50 ppm indica corrosión.

(VI) Presencia de cloruros en el agua mayor de 500 ppm indica corrosión.

(VII) Presencia de sólidos disueltos totales en el agua mayor de 1000 ppm indica corrosión.

(VIII) Presencia de hierro mayor a 2 ppm o de manganeso mayor de 1 ppm pueden causar precipitación de hidróxidos y óxidos de hierro y manganeso (incrustaciones).

(IX) Las aguas que contienen ácido sulfhídrico (detectable por su olor a huevo podrido) con concentraciones mayores a 1 ppm pueden causar una corrosión severa.

(X) Las aguas que contienen oxígeno disuelto con concentraciones mayores de 2 ppm son corrosivas.

(XI) La presencia de dos o más agentes corrosivos provoca que aumente el grado de corrosión en comparación con el efecto causado por los agentes en forma individual.

Presencia de jaleas bacterianas

Un grupo de organismos, comúnmente referidos como bacterias del hierro, son encontradas en algunas aguas subterráneas. Aunque estas no son dañinas a la salud, son organismos molestos que causan la obstrucción de los poros de la formación productora de agua y en las aberturas de la rejilla del pozo.

La bacteria produce acumulación de un material lodoso de consistencia gelatinosa, que oxidan y precipitan el hierro y el manganeso disueltos. Debido al efecto combinado del desarrollo de los organismos y el precipitado de los minerales, la obturación casi completa del pozo puede ocurrir en un corto tiempo. Casos reportados indican la reducción del 75% en el rendimiento del pozo ocurrió en períodos de 3 meses a un año.

Un tratamiento efectivo para esta condición es una solución relativamente fuerte de cloruros los cuales destruyen los organismos. El tratamiento con ácido hidroclorehídrico es a menudo usado seguido de tratamiento con cloro con el propósito de disolver el hierro y manganeso precipitado, por lo que hace posible la remoción de estos de la zona circundante del pozo bombeado. La corrosividad de las soluciones fuertes de cloruros, más la necesidad de que el tratamiento debería ser repetido periódicamente, hace que sea necesario usar una rejilla de pozo fabricada de un metal resistente a la corrosión para evitar los efectos del tratamiento químico. Esto justifica la selección apropiada del material.

Resistencia mecánica de la rejilla

La selección del material de la rejilla del pozo algunas veces esta basada en los requisitos de resistencia mecánica. Las dos cargas impuestas sobre la rejilla las cuales se consideran frecuentemente son la carga de la columna y la presión de colapso.

2.3.5 DISTRIBUCION DE LOS ELEMENTOS LISOS Y RANURADOS

Para la determinación de la distribución del ademe liso y ranurado, en primer lugar se tiene que elegir la longitud de este último, una vez conocida esta longitud, la tubería complementaria será tubería lisa.

ELECCION DE LA LONGITUD DE LA REJILLA

El ademe ranurado, también llamado cedazo o rejilla es el elemento del pozo que funciona como sección de captación del agua del acuífero. La rejilla cumple dos funciones básicas, por un lado permite que el agua del acuífero fluya libremente al pozo evitando que la arena penetre y por otro funciona como una estructura que estabiliza las paredes de la perforación en el caso de que la formación acuífera no este consolidada. Por lo tanto para que la rejilla sea eficiente debe cumplir con estos dos requisitos, los cuales se tienen que considerar al diseñar este elemento.

El diseño del cedazo involucra la determinación de tres factores que son: el diámetro, el tamaño de las aberturas de las ranuras y la longitud. La obtención del diámetro de la rejilla fue tratado en el capítulo 2.3.4, la elección del tamaño de las ranuras del ademe será analizado en el capítulo 2.3.6., en este capítulo se tratará lo relacionado con la longitud.

Para la elección de la longitud del ademe ranurado deben considerarse los siguientes factores: el espesor del acuífero, el abatimiento disponible y la estratificación que presenta la formación acuífera.

Existen cuatro condiciones típicas de acuífero, para las cuales se dan las siguientes recomendaciones en la elección de la longitud del ademe ranurado:

1.- Acuífero confinado homogéneo

En pozos perforados en este tipo de acuíferos se recomienda que la longitud de la rejilla sea del 70 % al 80% del espesor del acuífero, se elige el 70% si el espesor es menor o igual a 8 m, si el espesor se encuentra en el rango de 8 m a 15 m se recomienda que la longitud abarque el 75% del espesor del acuífero y si el espesor es superior a 15 m entonces se debe optar por una longitud de rejilla del 80% del espesor del acuífero.

El cedazo o rejilla se debe instalar centrado en el acuífero o bien dividir la rejilla en tramos de igual longitud e intercalar tramos de tubería ciega, como se muestra en la figura 2.6.

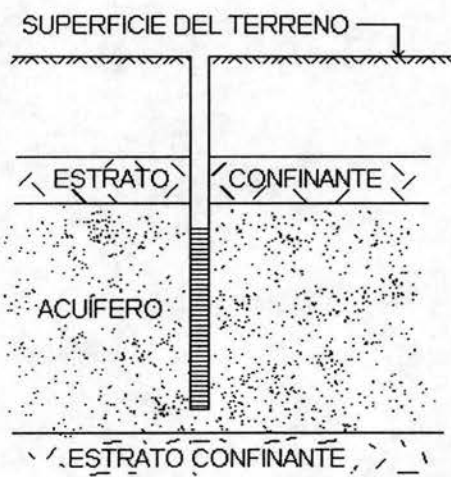
En este tipo de pozos se debe procurar que el nivel del agua (nivel dinámico) se ubique por arriba del techo del acuífero.

2.- Acuífero confinado no homogéneo (heterogéneo).

En este tipo de acuífero, es necesario que la rejilla se coloque en el estrato más permeable, lo que definirá la longitud y colocación de la misma.

3.- Acuífero libre homogéneo.

Para la determinación de la longitud de la rejilla en este tipo de acuíferos, se presentan dos alternativas contradictorias, por un lado el disponer de un cedazo lo más largo posible reduce la convergencia del flujo y por lo tanto la velocidad de entrada del agua por la rejilla con lo que se obtiene una mayor capacidad específica. Por otro lado, si se opta por elegir un cedazo lo más corto posible aumenta la capacidad de abatimiento y por lo tanto se obtiene mayor caudal, aumentando la posibilidad de que penetre arena al pozo por el incremento de la velocidad, lo que provocaría serios problemas. Lo anterior se ilustra en la figura 2.2.



REJILLA CENTRADA EN UN ACUÍFERO CONFINADO



COLOCACIÓN ALTERNADA DE TRAMOS LISOS Y RANURADOS

Figura 2.6 Colocación de la rejilla o cedazo en un acuífero confinado homogéneo

De lo anterior se desprende que si se desea que el costo del agua extraída sea el menor posible o si por cualquier política de extracción se desea poco abatimiento, la rejilla debe abarcar la mayor parte del espesor del acuífero.

Pero si se desea el mayor caudal, la rejilla se debe colocar sólo en la parte inferior del acuífero, aunque en este caso el costo del agua extraída será mayor y aumentará la posibilidad de arrastre de sólidos al darse una mayor velocidad de entrada del agua.

En términos generales, se puede decir que el mejor diseño para un acuífero libre homogéneo se logra colocando la rejilla en la parte inferior del acuífero con una longitud entre el 30 y el 50% (ó de $1/3$ a $1/2$) del espesor acuífero, siempre y cuando el espesor sea menor a 45 m. y abatir el nivel estático del agua hasta una altura ligeramente superior al de la rejilla, como se ilustra en la figura 2.7.

Resulta impráctico desde el punto de vista teórico (hidráulico) bombear un pozo en un acuífero libre a un abatimiento que exceda los $2/3$ de su espesor.

4.- Acuífero libre no homogéneo.

Para este tipo de acuíferos se consideran válidas las reglas establecidas para los acuíferos confinados no homogéneos, con la diferencia de que la rejilla se debe colocar en la parte inferior del acuífero más permeable.

Para calcular la longitud de la cámara de bombeo y la profundidad a alcanzar en el pozo, estará en función del nivel de bombeo y los posibles abatimientos debidos a sobreexplotación regional del acuífero, de tal forma, que la rejilla de la zona de admisión nunca quede seca y se provoquen problemas de incrustación en dicha tubería.

2.3.6 ELECCION DE LA ABERTURA DE LAS RANURAS DEL ADEME

Como se mencionó anteriormente existen los pozos de desarrollo natural y los que se construyen con filtro de grava. A continuación se tratará la elección de la abertura de las ranuras en cada uno de este tipo de pozos. Cabe mencionar que en ambos casos la selección se basa en la curva granulométrica acumulativa de las muestras obtenidas durante la perforación.

a) Pozos de desarrollo natural

Si la formación es homogénea se selecciona un tamaño de abertura que retenga del 40% al 50% de la formación acuífera (representada por el material muestreado), se opta por el 40% si las

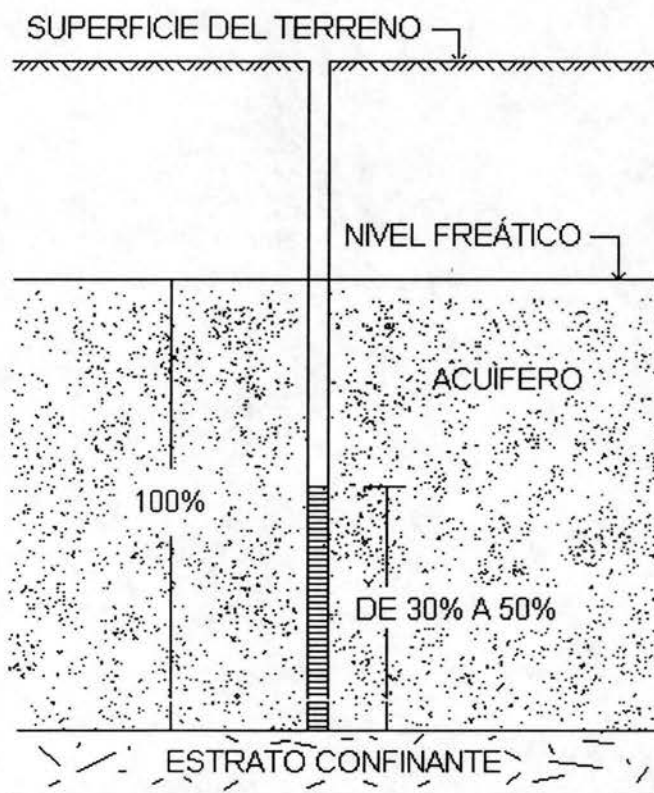


Figura 2.7 Colocación de la rejilla en un acuífero libre homogéneo

aguas no son corrosivas y el 50% en caso contrario, esto es con la finalidad de prever que la corrosión puede agrandar las ranuras provocando el paso de arena al pozo, este mismo 50% resulta recomendable si se tiene duda sobre la calidad de las muestras.

Si la formación es heterogénea, como es el caso más común en la naturaleza, esto es, que el acuífero este constituido por capas de diversa granulometría, la mejor alternativa, desde el punto de vista técnico es diseñar un cedazo de ranuras de tamaños múltiples de acuerdo a cada estrato, desafortunadamente en la práctica esto no es posible debido a la dificultad de disponer en corto tiempo de cedazos de diferentes ranuras.

b) Pozos con filtro de grava.

Este tipo de pozos difieren de los de desarrollo natural en el hecho de que como su nombre lo indica se les coloca un filtro de gravas graduadas entre la perforación y la rejilla.

Para este tipo de pozo se debe seleccionar una abertura de rejilla capaz de retener el 90% del filtro de grava.

2.3.7 ELECCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS GRAVAS PARA EL FILTRO

Filtro de gravas. Como su nombre lo indica funciona como filtro que evita que los materiales "finos" del acuífero penetren al pozo durante el bombeo, además estabiliza el acuífero y dado que la conductividad hidráulica del filtro es mayor que la del acuífero, se evitan pérdidas de carga excesivas.

No todos los pozos necesitan un filtro de gravas artificial. En algunos casos el suelo en el que se localiza el pozo tiene una granulometría tal, que forma su propio filtro. Desafortunadamente en la mayoría de los pozos es necesario la colocación de un filtro de gravas artificial.

Evidentemente un pozo construido con un filtro de grava cuesta más que uno desarrollado naturalmente, sin embargo hay ciertas condiciones geológicas que obligan al uso del filtro. Por ejemplo los acuíferos de formaciones aluviales en las que frecuentemente se encuentran intercalada arcillas, arenas y gravas de diferentes tamaños, se recomienda la utilización de un filtro de grava que impida que los materiales finos de la formación sean arrastrados al interior del pozo durante el bombeo, evitando con esto la utilización de tamaños pequeños de abertura del ademe, los que podrían ser fácilmente obstruidos, disminuyendo la eficiencia de éste e incluso su inutilización.

Se recomienda que si el tamaño de la ranura, al considerar el pozo con desarrollo natural, es menor de 0.010 pulgada (ranura no. 10) (0.254 mm), se considere la utilización de un filtro de grava.

El espesor del filtro de grava varía entre 8 cm y 20 cm, usualmente se utilizan espesores de 7.62 cm (3") y 10.2 cm (4").

DISEÑO DE FILTRO GRANULAR

A continuación se presentan varios métodos para el diseño de filtros de grava, en éstos se utilizan fórmulas cuyas variables principalmente se relacionan con el tamaño de los granos y su porcentaje en peso de algunos de estos tamaños en particular. Por lo que en forma general podemos decir que d_x significa el tamaño de las partículas "d" tal que el "x" porcentaje es más pequeño. Por lo tanto $100-x$ será el porcentaje retenido por la malla de abertura "d". Por ejemplo 2_{90} quiere decir que el 90% del total del material es menor a 2mm y el 10% es mayor.

Los siguientes conceptos son básicos para el estudio del diseño de filtros:

Coefficiente de uniformidad (Cu).- Es la razón del tamaño d_{60} respecto al tamaño d_{10} del material.

$$Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

El valor de $Cu=1$ no se da en materiales naturales ya que representa una homogeneidad perfecta.

Tamaño efectivo (d_{10}).- Es el tamaño del tamiz que retiene el 90% de la muestra, o bien deja pasar el 10%.

METODO DE NOLD

Este método fue desarrollado en 1962, y se obtienen dos valores correspondientes a los límites superior e inferior de los tamaños del grano del filtro.

El método de Nold se basa en el coeficiente de uniformidad, si este valor se encuentra entre 3 y 5 el d_{95} del acuífero se multiplica por 5, obteniéndose así el límite superior del filtro, para obtener el límite inferior el d_{90} del acuífero se multiplica por 4.

En el caso de que el coeficiente de uniformidad sea menor de 3, el d_{85} del acuífero multiplicado por 5 nos da el límite superior del filtro y el d_{75} multiplicado por 4 nos proporciona el límite inferior. Ver tabla 2.3.

Coeficiente de Uniformidad del Acuífero (d_{60}/d_{10})	Límite Superior	Límite Inferior
Entre 3 y 5	$d_{95} \times 5$	$d_{90} \times 4$
Menor a 3	$d_{85} \times 5$	$d_{75} \times 4$

Tabla 2.3 Valores para la obtención del límite superior e inferior del filtro de grava, al utilizar el método de Nold.

Como ejemplo de este método en la figura 2.8 se presentan las gráficas granulométricas de dos acuíferos "A" y "B".

Para el acuífero "A" se tiene:

$$Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0.15}{0.053} = 2.83$$

por lo tanto los límites serán:

$$\text{límite superior} = d_{85} \times 5 = 0.25 \times 5 = 1.1 \text{ mm}$$

$$\text{límite inferior} = d_{75} \times 4 = 0.20 \times 4 = 0.80 \text{ mm}$$

Para el acuífero "B":

$$Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0.79}{0.17} = 4.64$$

En este caso como $3 < Cu < 5$, los límites de los tamaños de los granos para el filtro son los siguientes:

$$\text{Límite superior} = d_{95} \times 5 = 3.2 \times 5 = 16 \text{ mm}$$

$$\text{Límite inferior} = d_{90} \times 4 = 2.5 \times 4 = 10 \text{ mm}$$

METODO DE FUCHS (MODIFICADO)

Este método se desarrolló en 1963 y se aplica preferentemente a acuíferos heterogéneos y se basa en el coeficiente de uniformidad del acuífero.

Así, si el coeficiente de uniformidad es menor a 3:

$$d_{85} \text{ del acuífero} \times 4 = d_{50} \text{ del filtro}$$

$$d_{50} \text{ del acuífero} \times 16 = d_{50} \text{ del filtro}$$

Se toma como tamaño del filtro el menor valor de los dos d_{50} obtenidos.

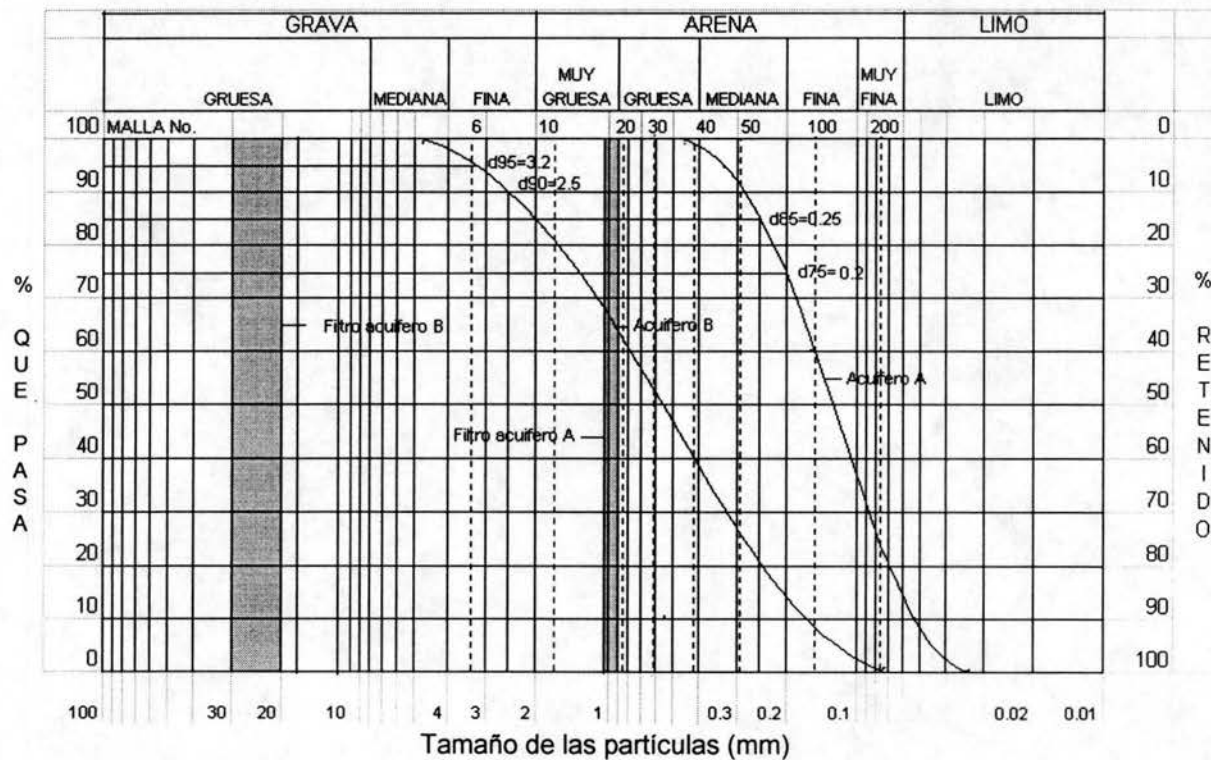


Figura 2.8 Método de Nold

Si el coeficiente de uniformidad varía entre 3 y 5:

$$d_{85} \text{ del acuífero} \times 4 = d_{50} \text{ del filtro}$$

$$d_{50} \text{ del acuífero} \times 10 = d_{50} \text{ del filtro}$$

Se toma como tamaño del filtro el menor valor de los dos d_{50} obtenidos.

Utilizando como pivote el d_{50} del filtro se admiten filtros cuyo coeficiente de uniformidad no exceda de 3.

Por ejemplo, en la figura 2.9 se presentan dos gráficas granulométricas de los acuíferos A y B, los cuales son uniforme y no uniforme, respectivamente.

Para el acuífero "A", de la gráfica se obtienen los siguientes datos:

$$Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0.15}{0.053} = 2.83$$

$$d_{85} = 0.25$$

$$d_{50} = 0.13$$

Entonces:

$$d_{50} \text{ del filtro} = d_{85} \text{ del acuífero} \times 4 = 0.25 \times 4 = 1.0$$

$$d_{50} \text{ del filtro} = d_{50} \text{ del acuífero} \times 16 = 0.13 \times 16 = 2.08$$

Se elige el d_{50} menor, tomando como centro este valor se construye una gráfica con un coeficiente de uniformidad menor o igual a 3. En este caso la curva del filtro tiene un $d_{60} = 1.25$ y $d_{10} = 0.42$ por lo que $Cu = 2.98$.

Para el caso del acuífero "B" se obtienen los siguientes datos:

$$Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0.79}{0.17} = 4.64$$

$$d_{85} = 2.0$$

$$d_{50} = 0.54$$

Como el coeficiente de uniformidad varía entre 3 y 5, el d_{50} se obtiene de la siguiente manera:

$$d_{50} \text{ del filtro} = d_{85} \text{ del acuífero} \times 4 = 2.0 \times 4 = 8 \text{ mm}$$

$$d_{50} \text{ del filtro} = d_{50} \text{ del acuífero} \times 10 = 0.54 \times 10 = 5.40 \text{ mm}$$

Se elige el menor que es 5.40 mm, tomando este valor como centro se construye la gráfica del filtro, la cual no debe tener un coeficiente de uniformidad mayor que 3. En este caso la gráfica del filtro tiene un $d_{60} = 6.9$ y $d_{10} = 3$ con un $Cu = 2.30$.

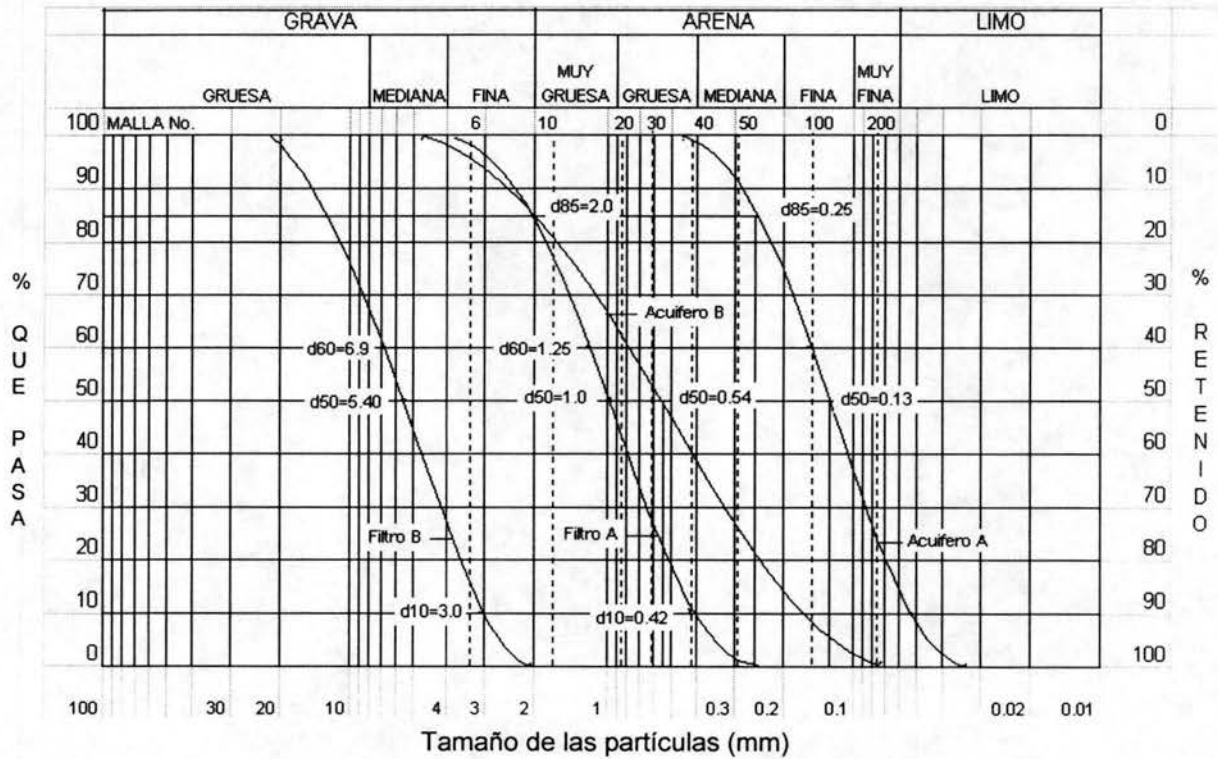


Figura 2.9 Método de Fuchs

MÉTODO DE KRUSE (MODIFICADO)

Este método se basa principalmente en la relación entre los tamaños de granos para el filtro y el acuífero en sus d_{50} , los valores de la relación F/A se deben escoger según las características del acuífero y del filtro granular, los valores recomendados para estabilizar las arenas se dan en la tabla 2.4.

Acuífero	Filtro Granular	Valor Máximo de F/A
Uniforme	Uniforme	9.5
No uniforme	Uniforme	13.5
Uniforme	No uniforme	13.5
No uniforme	No uniforme	17.5

Tabla 2.4 Valores de F/A para la obtención del filtro de grava mediante el método de Kruse.

Una vez seleccionado el valor de F/A se multiplica por el d_{50} del acuífero, obteniéndose de esta manera el tamaño del d_{50} del filtro granular.

Si el filtro no es uniforme se utilizan como centro el d_{50} y se construye la gráfica del filtro, en la cual el coeficiente de uniformidad no excederá de 3.

Si por el contrario el filtro es uniforme, se eligen las mallas que se acerquen más al d_{50} obtenido; una con un diámetro de abertura mayor y otra menor.

En la figura 2.10 se presenta una gráfica de un suelo uniforme, de donde se obtienen los siguientes datos:

$$d_{50} = 0.13$$

$$Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0.15}{0.053} = 2.83$$

Se consideraron para este ejemplo el diseño de los dos filtros, uno uniforme y el otro no uniforme. Para un filtro uniforme el valor máximo de F/A tomando de la tabla 2.4 es 9.5, por lo tanto:

$$d_{50} \text{ filtro} = (d_{50} \text{ acuífero}) (9.5) = 0.13 (9.5) = 1.24$$

Las cribas inmediatas superior e inferior son la no. 16 y no. 18 (1.68 mm y 1.19mm), respectivamente.

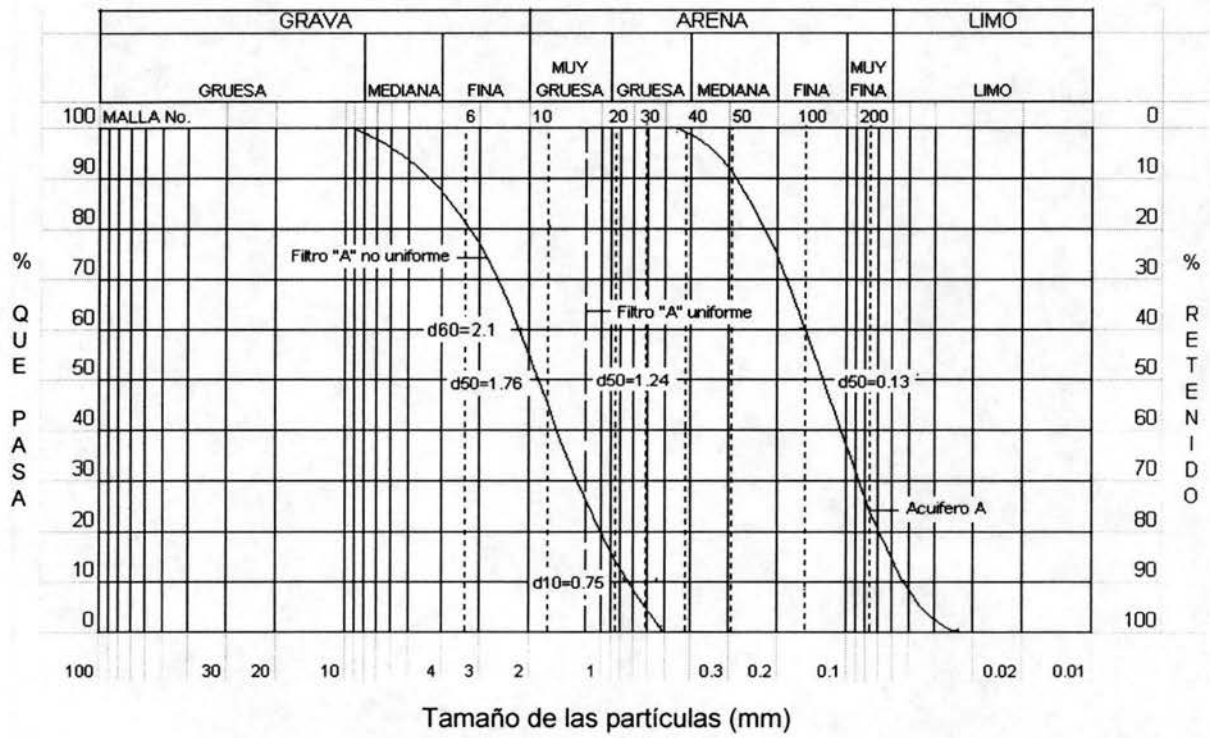


Figura 2.10 Método de Kruse

Si se desea un filtro no uniforme, el valor máximo de $F/A = 13.5$, por lo tanto:

$$d_{50} \text{ filtro} = (d_{50} \text{ acuífero}) (13.5) = 0.13 (13.5) = 1.76$$

Con este valor de $d_{50} = 1.76$, como centro de la gráfica se construye esta con un coeficiente de uniformidad menor de 3, en este caso $d_{60} = 2.10$ y $d_{10} = 0.75$; $C_u = 2.8$

En el caso de que el acuífero sea no uniforme se sigue un procedimiento análogo, tomando los valores correspondientes a un acuífero de este tipo, de la tabla 2.4.

METODO DE STOW

En este método la curva del filtro granular se obtiene a partir de los siguientes cálculos:

$$d_{85} \text{ filtro} = d_{85} \text{ acuífero} \times 5$$

$$d_{50} \text{ filtro} = d_{50} \text{ acuífero} \times 5$$

$$d_{15} \text{ filtro} = d_{15} \text{ acuífero} \times 5$$

El método establece además que la relación d_{85} / d_{15} del filtro debe ser menor a 5, en caso contrario hay que ajustar el d_{85} y el d_{15} para obtener el límite máximo permitido.

A continuación, en la figura 2.11 se presentan las gráficas de dos acuíferos, para los cuales se obtendrán las curvas granulométricas de los respectivos filtros granulares, a partir del método de Stow. A partir de estas gráficas se obtiene para el acuífero "A" los siguientes datos:

$$d_{85} \text{ del acuífero} = 0.25$$

$$d_{50} \text{ del acuífero} = 0.13$$

$$d_{15} \text{ del acuífero} = 0.06$$

Con estos datos se obtienen los correspondientes al filtro de grava.

$$d_{85} \text{ del filtro} = (d_{85} \text{ del acuífero}) (5) = 0.25 \times 5 = 1.25$$

$$d_{50} \text{ del filtro} = (d_{50} \text{ del acuífero}) (5) = 0.13 \times 5 = 0.65$$

$$d_{15} \text{ del filtro} = (d_{15} \text{ del acuífero}) (5) = 0.06 \times 5 = 0.30$$

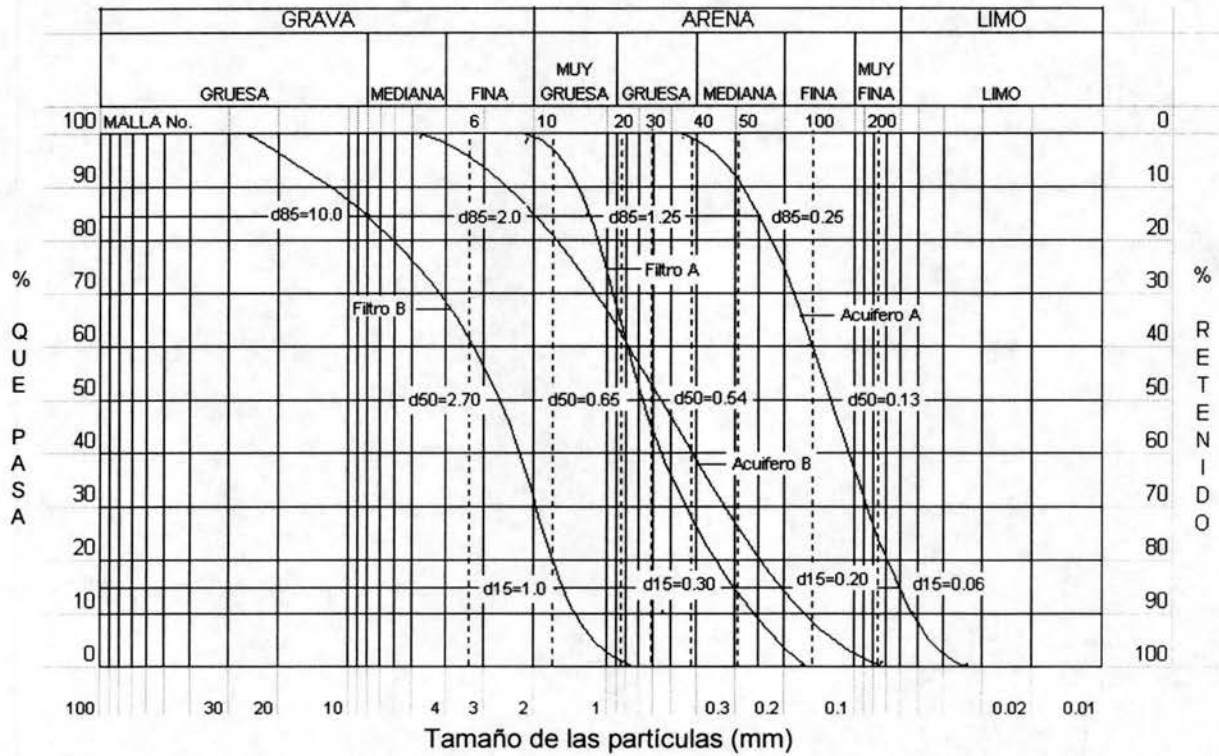


Figura 2.11 Método de Stow

$$\frac{d_{85}}{d_{15}} = \frac{1.25}{0.30} = 4.17 < 5 ; \text{ por lo tanto no hay que ajustar.}$$

Con los puntos calculados se construye la gráfica del filtro.

Para la curva "B" se obtienen los siguientes datos:

$$d_{85} \text{ del acuífero} = 2.0$$

$$d_{50} \text{ del acuífero} = 0.54$$

$$d_{15} \text{ del acuífero} = 0.20$$

Los puntos del filtro para el acuífero "B" son:

$$d_{85} \text{ del filtro} = (d_{85} \text{ del acuífero}) (5) = 2.0 \times 5 = 10$$

$$d_{50} \text{ del filtro} = (d_{50} \text{ del acuífero}) (5) = 0.54 \times 5 = 2.70$$

$$d_{15} \text{ del filtro} = (d_{15} \text{ del acuífero}) (5) = 0.20 \times 5 = 1.0$$

Calculando la relación $\frac{d_{85}}{d_{15}}$;

$$\frac{10}{1.0} = 10 ; \text{ por lo tanto hay que ajustar estos valores:}$$

$$d_{85} = 8$$

$$d_{15} = 1.60$$

$$\frac{d_{85}}{d_{15}} = \frac{8}{1.60} = 5.0$$

Con estos tres puntos se grafica la curva granulométrica del filtro para el acuífero "B".

METODO DE JOHNSON

A continuación se describe el método de Johnson para el diseño de un filtro artificial de grava. Es uno de los más utilizados.

1.- Como primer paso se grafican las curvas granulométricas de todos los estratos de la formación acuífera. De éstas gráficas se elige la que represente al material más fino y es de ésta de la que se obtiene la granulometría del filtro de grava.

Con la gráfica del estrato más fino, se localiza en el eje horizontal el tamaño de grano correspondiente al d_{30} . El valor así obtenido se multiplica por un factor que va de 4 a 9, dependiendo de las características del acuífero, de acuerdo a las siguientes condiciones:

Factor	Características del acuífero
4	Material de la formación fino y uniforme
6	Material de la formación más grueso y no uniforme
Entre 6 y 9	Formación acuífera de granulometría muy poco uniforme y contiene limo

El resultado numérico obtenido (tamaño del grano) corresponde al d_{30} de la gráfica para la granulometría del filtro deseado. Con esto se obtiene un punto de la gráfica.

2.- Posteriormente se dibuja una curva que pase por el punto encontrado y que tenga un coeficiente de uniformidad de 2.5 ó menor. Es recomendable trazar la curva lo más uniforme posible o sea con un bajo coeficiente de uniformidad.

3.- Una vez que se tiene la gráfica granulométrica del filtro de grava se escogen 4 ó 5 tamaños de cribas que abarquen toda la granulometría de la curva. Una vez seleccionado el tamaño de las cribas se le da un rango de tolerancia de ± 8 por ciento del retenido en cada criba.

En la figura 2.12 se tiene la curva granulométrica de un acuífero no uniforme con un $d_{30} = 0.32$, de la observación de la curva se decide utilizar un factor = 6, por lo tanto;

$$d_{30} \text{ filtro} = (d_{30} \text{ acuífero}) (6) = 0.32 \times 6 = 1.92$$

Con este d_{30} del filtro se construye la gráfica, la cual debe tener un coeficiente de uniformidad menor a 2.5. Se obtienen los valores $d_{60} = 3.20$ y $d_{10} = 1.28$ con un coeficiente de uniformidad = 2.5.

A los lados de la gráfica del filtro se dibujan dos líneas de seguridad con un rango de + y - 8%.

Cualquier filtro granulométrico cuya curva se encuentre dentro del área de seguridad será aceptado.

El material utilizado para la formación del filtro será de preferencia gravas de cuarzo, ya que no son fácilmente cementables, o en su defecto se utilizarán gravas procedentes de ríos o arroyos, pero nunca se utilizará material producto de trituración.

Las gravas utilizadas deberán estar lavadas y ser redondeadas. Su tamaño será el especificado de acuerdo a un análisis granulométrico.

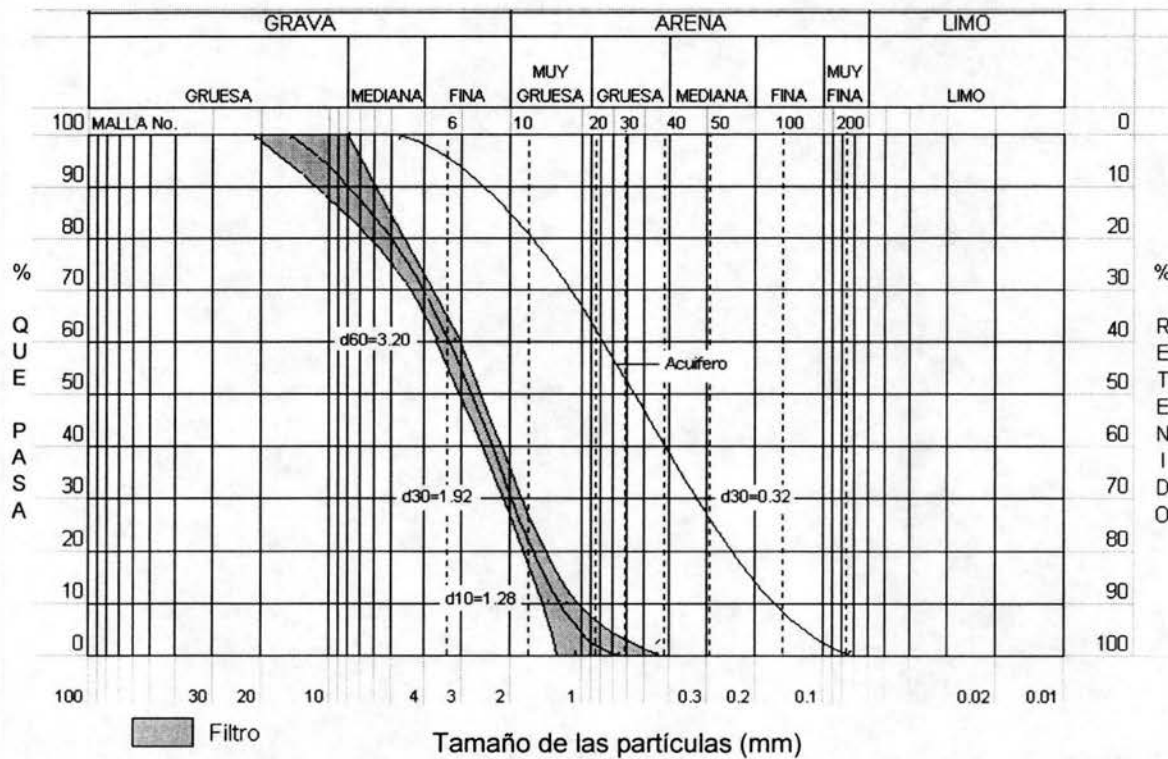


Figura 2.12 Método de Johnson

CAPITULO 3 CONSTRUCCION DE POZOS PROFUNDOS

3.1 TIPOS DE PERFORACION

PERFORACION A PERCUSION

El sistema para perforar a percusión es el más antiguo. No obstante, en la actualidad está dotado de los últimos adelantos, con lo cual hoy día su utilización se da con bastante frecuencia en la perforación de pozos para agua.

Los precursores de la perforación a percusión han sido el pico y la pala, los cuales realizan las funciones que hoy realizan el trépano y la válvula o cuchara.

A partir del pico y la pala el sistema ha ido evolucionando paulatinamente, hasta llegar a las máquinas actuales, las cuales son estructuras metálicas y que aprovechan casi exclusivamente la energía de motores a explosión o combustión

Básicamente la máquina cuenta con los mecanismos necesarios para realizar tres funciones:

- a) Percusión.- Consiste en ciclos repetitivos de subir y dejar caer la herramienta de perforación.
- b) Extracción de detritus.- Se realiza con la cuchara o válvula, a diferencia del anterior este mecanismo se caracteriza por realizar la bajada y subida de la cuchara a gran velocidad, con lo cual reduce considerablemente el tiempo de limpieza.
- c) Manejo de tubería y herramientas.- Se emplea para ello un sistema de cable y poleas, cuya resistencia esta en función del peso que se vaya a manejar.

Para realizar cada una de las funciones anteriores, la máquina perforadora a percusión cuenta, en términos generales, con un motor, una armazón con sus respectivos mecanismos y el mástil.

El mástil es una estructura metálica telescópica que para su fácil traslado, se retrae la parte superior y se dobla sobre la máquina. Este mástil tiene por objeto permitir que la sarta de herramientas salga completamente de la perforación.

Mediante una serie de mecanismos como: correas trapezoidales, cadenas, engranes y poleas, el motor imparte el movimiento necesario en las diferentes tareas de perforación. La figura 3.1 muestra el esquema de una máquina de perforación a percusión.

Sarta de perforación.- Es el conjunto de herramientas con el cual se realizan los trabajos de perforación y/o pesca o rescate, está formada por cuatro herramientas, las cuales de abajo hacia arriba son las siguientes:

- a) Trépano o herramienta de corte.
- b) Barretón o barra de peso.
- c) Tijeras de perforación.
- d) Porta cable giratorio (al cual se conecta el cable de perforación).

La figura 3.2 muestra la sarta de perforación.

La unión de diferentes partes que componen la sarta se realiza mediante el enroscado de un piñón y una caja, empleando llaves especiales con boca de sección cuadrada. Las cuerdas se construyen de acuerdo a las normas A.P.I. (American Petroleum Institute), en las cuales los asientos de las uniones coinciden en toda su superficie al dar el apriete con la torsión adecuada, como se muestra en la figura 3.3.

A continuación se describe cada una de las herramientas que conforman dicha sarta.

TREPANO O BROCA

Es la herramienta de ataque, por lo tanto es propiamente la encargada de realizar la perforación. Consta básicamente de un filo de penetración o dos, en forma de cruz que fracturan y disgregan la formación; un cuerpo que transmite el peso necesario para el impacto y que mediante cambios en su configuración geométrica, produce una agitación mecánica de lodo que se adiciona o que se va formando con la perforación, de tal manera que el material es puesto en suspensión, facilitando su extracción por medio de la cuchara.

Las funciones principales del trépano son las siguientes:

- 1.- Penetrar en la formación.
- 2.- Triturar la formación para obtener detritus cuyo tamaño sea de fácil extracción.
- 3.- Escariar al diámetro deseado.
- 4.- Mezclar el material producto del corte de la formación, con el agua que se adicione o que se encuentre en la propia formación, de tal manera que se facilite su extracción.

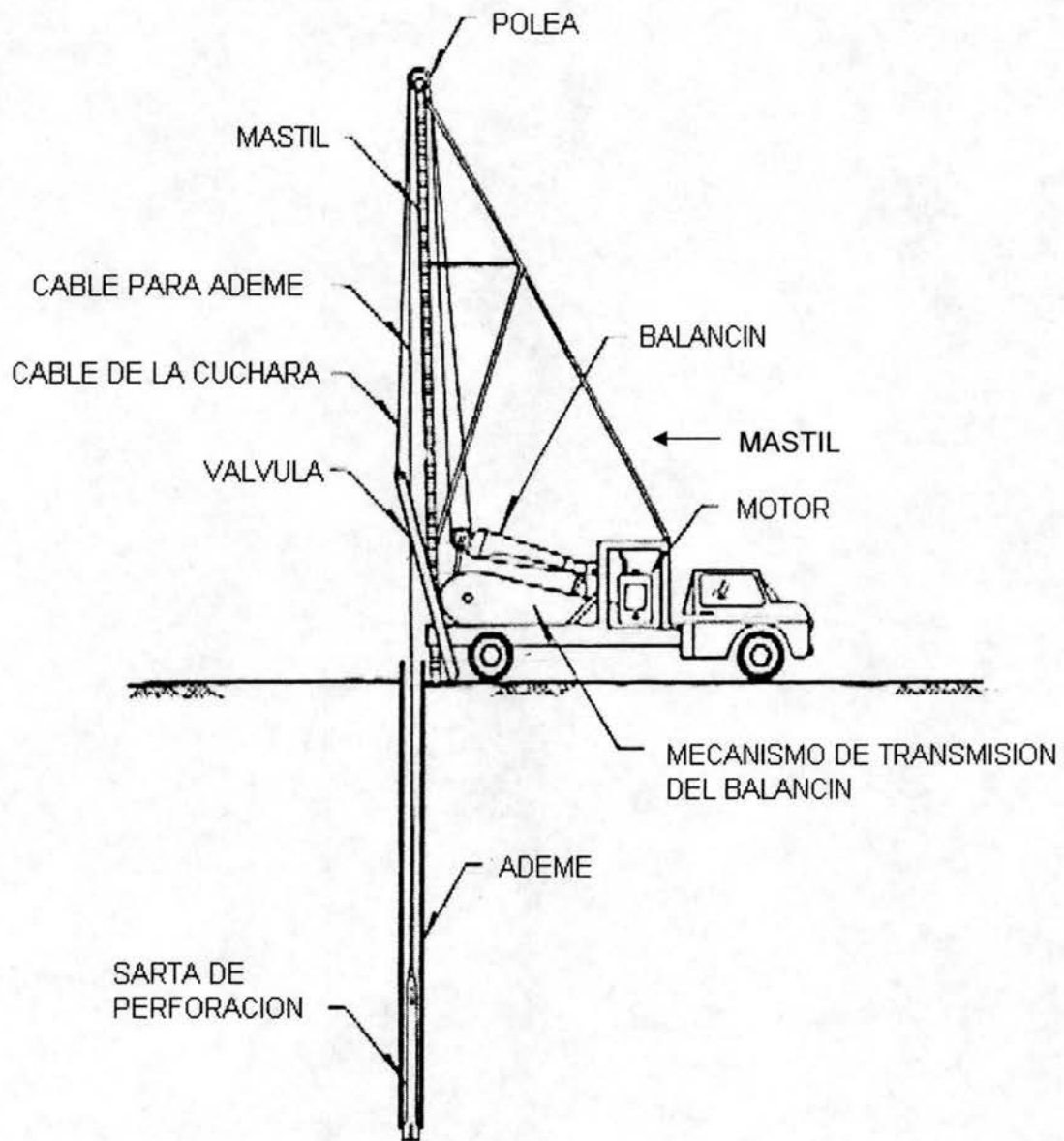


Figura 3.1 Perforadora a percusión.

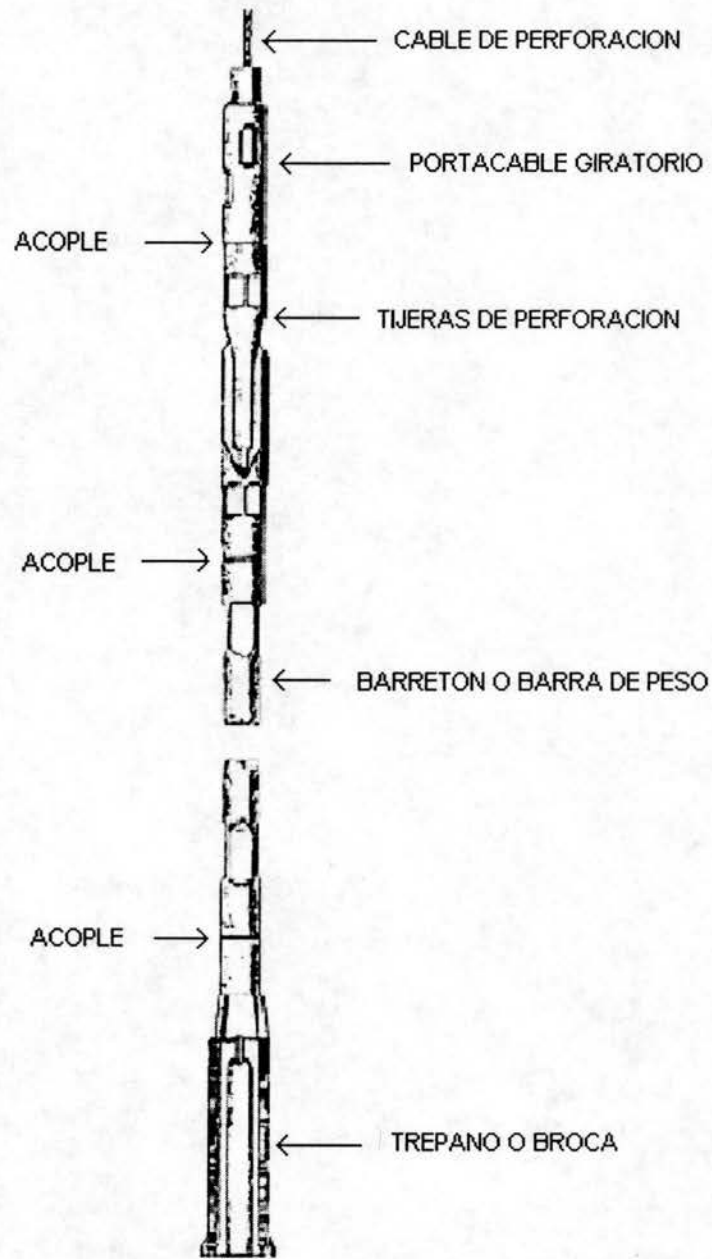


Figura 3.2 Sarta de perforación, con sus cuatro elementos que la forman, para la perforación a percusión.

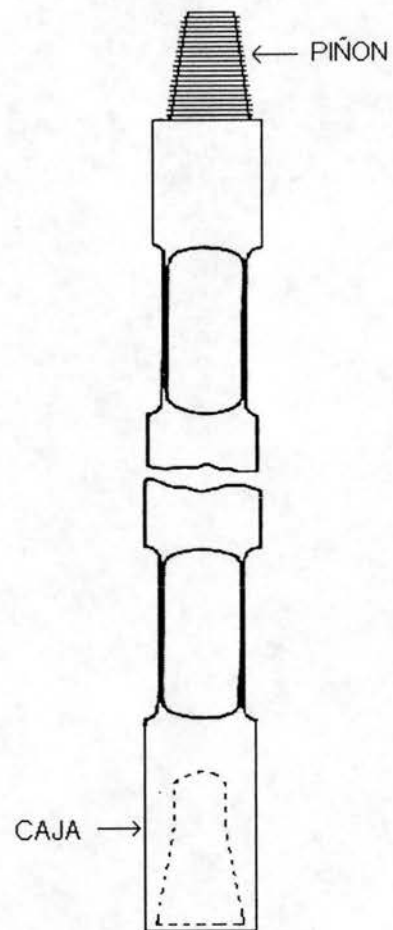


Figura 3.3 Sistema de acoplamiento A.P.I.

En lo que respecta al filo de ataque, éste deberá adaptarse a las características de la formación a perforar, ya que dependiendo de éstas, alguna o algunas de las funciones del trépano adquieren mayor importancia, por ejemplo: en el caso de materiales suaves, como arcillas y magras la función principal no es la de ataque, sino la de mezclado para poner en suspensión el mayor número de detritus y poder efectuar fácilmente y en forma continua su extracción, en otras como las rocas calizas, la función más importante es la de penetración, en caso de que presente un alto contenido de sílice, la función de escariar también debe ser considerada.

De lo anterior se desprende que hay que conocer las características físicas de las formaciones para atravesar, ya que sólo así se podrá adecuar la configuración del trépano, para que se logre la mayor eficiencia en el avance de la perforación.

En la figura 3.4 se muestran diferentes tipos de trépanos.

BARRETON O BARRA MAESTRA

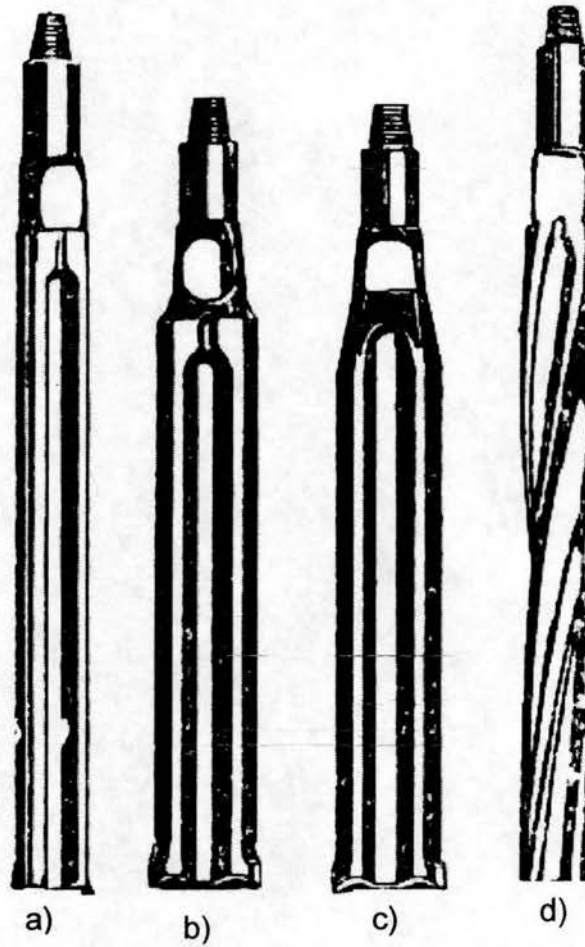
El barretón o barra maestra es una barra redonda de acero. Para ser instalada en la sarta cuenta con un piñón (macho) en la parte superior y una caja (hembra) en la parte inferior. Su función es proporcionar el peso necesario a las herramientas de perforación y guiar ésta en forma vertical dentro de la perforación. Por lo general las barretas están constituidas de lingotes de acero de una sola pieza; sin embargo, existen algunos casos en los que sus extremos, el piñón y la caja, son forjados de acero al alto carbón, soldados y tratados térmicamente.

Las longitudes y pesos de los barretones, deben guardar una relación entre las herramientas que forma la sarta y la capacidad del equipo de perforación para lograr un trabajo rápido y eficiente.

En la figura 3.5 se muestra el barretón o barra maestra.

TIJERAS DE PERFORACIÓN O "PERCUTOR"

Las tijeras de perforación forman parte de la sarta. Se colocan entre el porta cable y el barretón, excepto cuando se realizan operaciones de pesca, en cuyo caso se conectan después del barretón. Se construyen de acero de aleación forjadas de una pieza y los eslabones son unidos por soldadura a forja y posteriormente son sometidos a un tratamiento térmico para uniformizar su estructura molecular. La longitud de la carrera de las tijeras varía de 114.3 mm (4 ½") a 203.2 mm (8") y su peso y diámetro están correlacionados con el de la sarta y capacidad del equipo.



- a) Trépano tipo regular
- b) Trépano tipo california de hombros rectos
- c) Trépano tipo california de hombros en bisel
- d) Trépano tipo salomónico

Figura 3.4 Trépanos utilizados en la perforación a percusión.



Figura 3.5 Barretón o barra maestra.

Tiene fundamentalmente dos funciones: una de ellas es que, al ser su forma similar a la de dos eslabones de cadena permite un juego entre ellas que disminuye el chicoteo del cable al estar perforando, en segundo lugar, pero no menos importante es que además es un elemento de seguridad, ya que en caso de algún derrumbe en el que quede atrapada la herramienta, permite un golpeteo hacia arriba, con lo cual generalmente se libera dicha herramienta. La figura 3.6 muestra las tijeras de perforación.

PORTA CABLE GIRATORIO

Es una herramienta de sección cilíndrica, con una perforación concéntrica, en la cual se aloja una bala o mandril, que a su vez está unida al cable de perforación. En su parte inferior tiene una caja para enroscar el piñón de las tijeras de perforación.

La función del porta cable giratorio es permitir que la sarta gire después de cada golpe, logrando con esto una perforación de sección circular. En la figura 3.7 se muestra el porta cable.

Para evitar el desprendimiento de alguna de las herramientas de la sarta de perforación o incluso de la totalidad de ella, es menester poner especial atención a la unión del cable en el soquet.

CUCHARA O CUBETA

A diferencia de las perforaciones realizadas con equipo rotatorio, en las que el material producto del corte o detritus es desalojado por medio de lodos de perforación; en las efectuadas por percusión el material triturado es extraído por medio de la llamada cuchara, también conocida como cubeta o por medio de bombas areneras. La cuchara consta de un tubo de lámina de acero, en la parte superior lleva soldada o remachada una asa a la que se sujeta el cable de la línea de cuchareo, en la parte inferior cuenta con una válvula que permite la entrada del material triturado, cabe mencionar que éste se encuentra mezclado con agua, lo que lo convierte en fluido. La válvula inferior puede ser de tipo plana o de dardo.

La tipo plana es una válvula de charnela con movimiento de bisagra, que al ser sumergida en el material se abre dejando que éste penetre, cerrándose al ser elevada. Cuando la válvula es de dardo ésta se abre cuando hace contacto con el fondo del pozo permitiendo el paso de los materiales cortados y se cierra automáticamente al levantar la cuchara. La figura 3.8 muestra las cubetas empleadas en el cuchareo.



Figura 3.6 Tijeras de perforación.

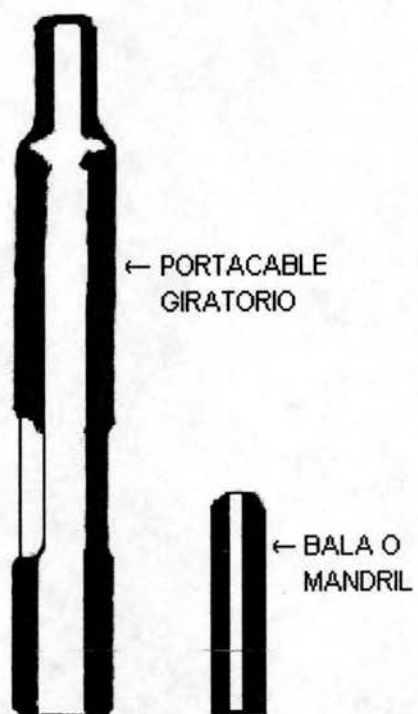


Figura 3.7 Porta cable giratorio.



VALVULA DE DARDO



VALVULA DE BISAGRA

Figura 3.8 Válvulas o cubetas de cuchareo.

METODO DE PERFORACION A ROTACION DIRECTA

Este método consiste en la aplicación de un peso suficiente en el fondo del pozo, para romper la estructura de la roca, mediante la utilización de una herramienta de corte (broca o barrena) auxiliada por el movimiento de rotación que le es impartido desde la superficie.

La máquina rotatoria es un equipo transportable que consta de una plataforma de perfiles de acero, sobre la cual se ajusta una torre o mástil, generalmente formada de dos secciones, la cual en su extremo superior tiene instaladas varias poleas, por medio de éstas y con ayuda de cables de acero se realizan las maniobras de izado de herramientas y tuberías de perforación. En la base de la torre se encuentra instalada la mesa rotatoria, la cual es concéntrica al eje del mástil y tiene la finalidad de transmitir el movimiento rotatorio a la tubería de perforación y por consiguiente a la broca o trépano instalado en la parte inferior de ésta. La mesa rotatoria cuenta en su parte inferior con un dado, el cual es de sección hexagonal o rectangular, a este dado se ajusta el tramo superior de la tubería de perforación, llamado Kelly, pudiendo desplegarse longitudinalmente. La figura 3.9 muestra las partes principales de un equipo de perforación a rotación.

El extremo superior del Kelly se une a una pieza especial giratoria denominada comúnmente "swivel", el cual se ajusta a la manguera de lodos que proviene de la bomba de circulación de fluidos. De esta forma el lodo circula también a través de la tubería de perforación y trépano, retornando a la parte superior de la perforación por el espacio anular que queda entre la tubería y la pared del pozo.

La broca al girar, y debido al peso que se le adiciona con las barras de peso, las cuales se colocan justamente arriba de la barrena, corta y desmenuza el material conforme penetra la perforación, para desalojar este material y limpiar el fondo del pozo se bombea continuamente un fluido o lodo de perforación a través de la tubería de perforación, el cual es expulsado a través de la broca y golpea el fondo del pozo, limpiando el mismo del corte realizado. El fluido continúa desplazándose verticalmente hacia la superficie a través del espacio anular que se halla alrededor de la tubería, acarreando los cortes a la superficie.

SISTEMA DE CIRCULACION DE LODOS

Una vez que el fluido de perforación ha retornado a la superficie, se encausa hasta un tanque de sedimentación, por medio de una zanja, en la cual se coloca una criba que detenga los fragmentos cortados. Ya en el tanque el fluido de perforación se detiene un rato para que se asienten las arenas y otros materiales granulares, acto seguido dicho fluido pasa al tanque de succión donde es nuevamente absorbido. En la figura 3.10 se esquematiza la circulación del lodo de perforación en el sistema a rotación directa.

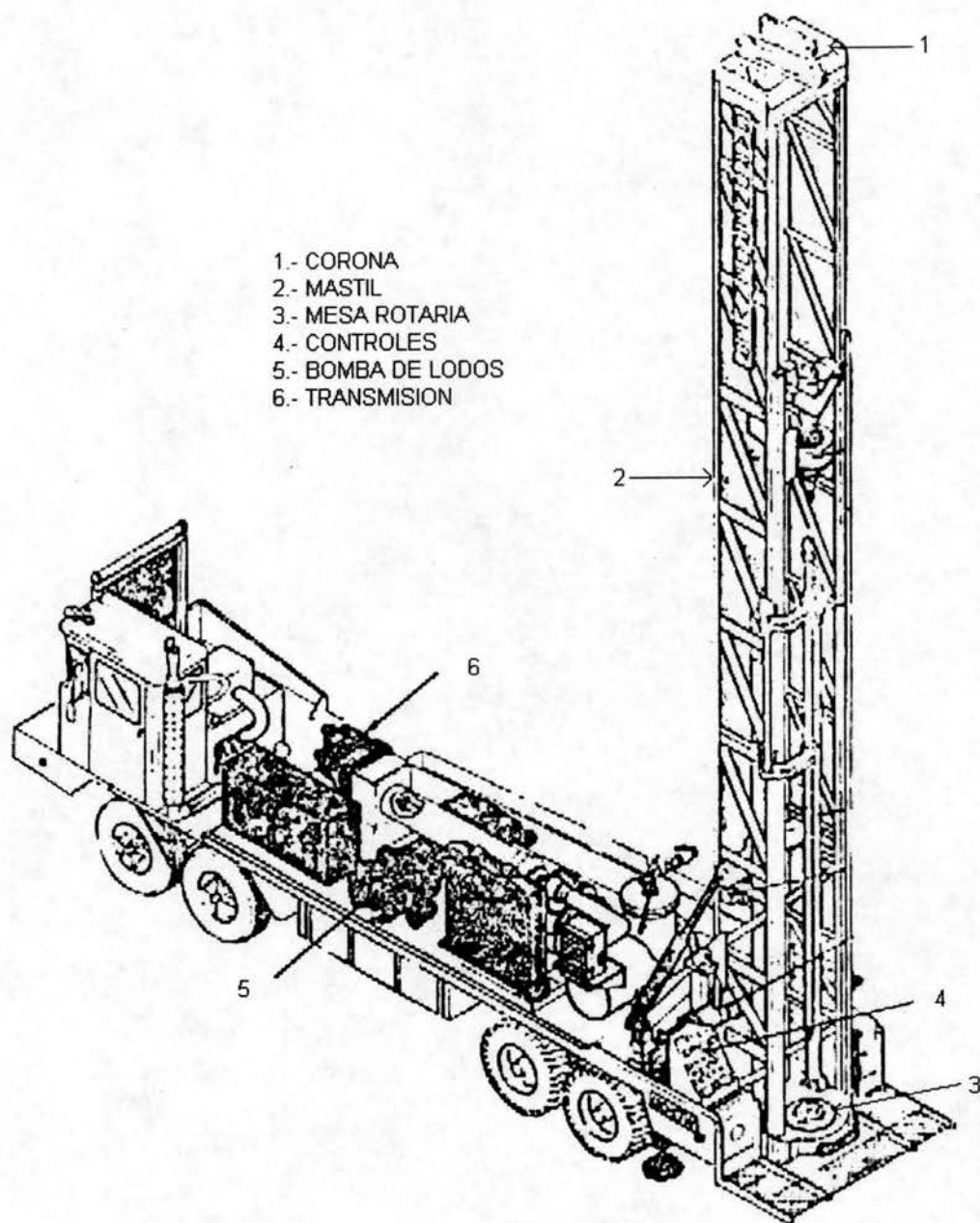


Figura 3.9 Equipo de perforación tipo rotatorio

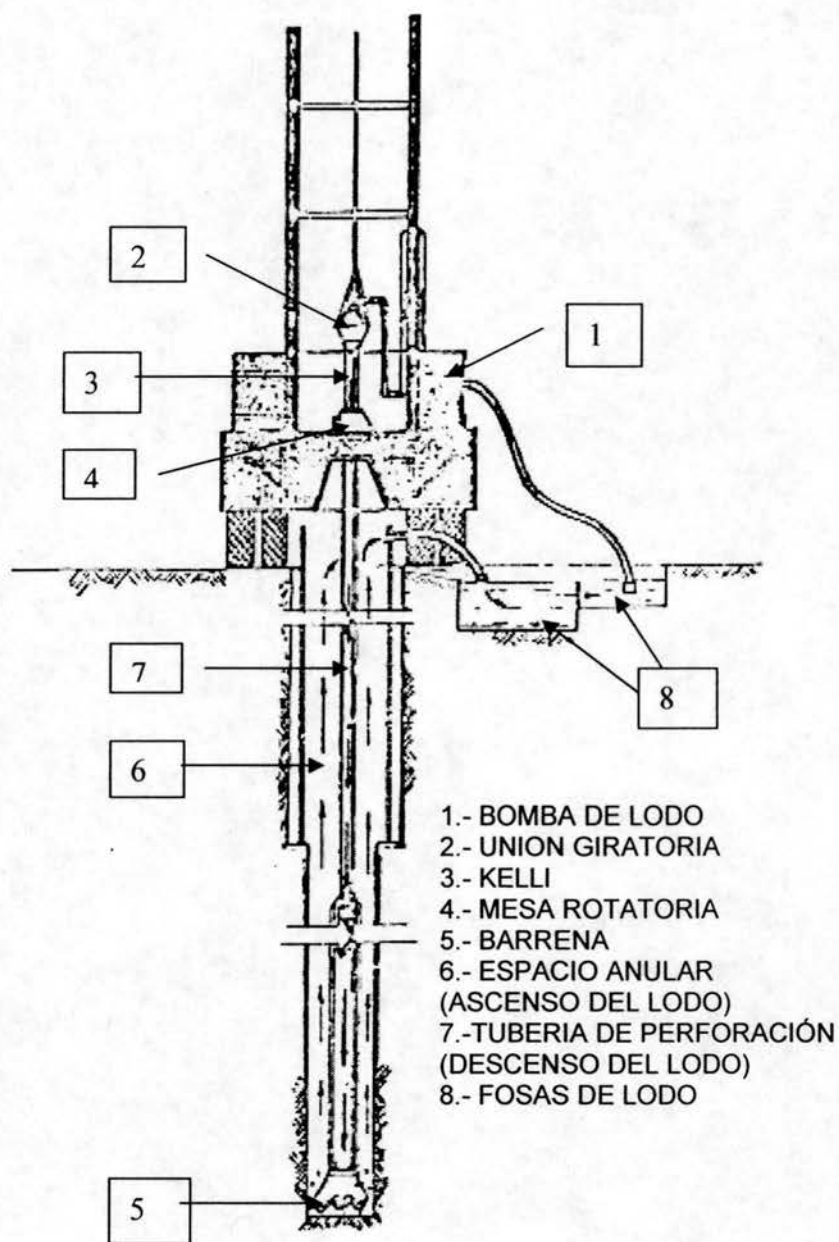


Figura 3.10 Sistema de circulación de lodos en el método de circulación directa.

El fluido puede consistir en una mezcla de arcilla y agua. La arcilla puede ser natural o una combinación de natural y comercial; la comercial es generalmente la bentonita.

Por lo general, existe una pérdida de fluido durante la perforación, pero si esta se vuelve excesiva debe anotarse cuidadosamente la profundidad y extraer muestras. Si por el contrario el fluido de perforación se incrementa, es probable que se haya encontrado una formación artesiana con presión hidrostática superior a la de la columna de lodos del pozo.

CONTROL DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION

Cuando se emplea equipo de perforación del tipo rotatorio y se usan como fluidos de perforación lodos bentoníticos es de gran utilidad conocer con precisión las características de salinidad del agua con que se prepara el lodo, ya que a medida que se avanza en la perforación es conveniente tomar muestras de retorno de lodos, con el objeto de realizar estudios físico-químicos como: salinidad, viscosidad y densidad. Si se comparan los resultados del fluido antes y después de haber circulado a través del pozo podremos detectar estratos salinos o contaminados con elementos químicos nocivos para las plantas, animales o humanos.

METODO DE PERFORACION A ROTACION INVERSA

Los principios en los que se basa este método son los mismos que los del método de perforación a rotación directa y los propios de los fluidos de perforación que se utilizan.

El método como su nombre lo indica, consiste en invertir el sentido de circulación del fluido de perforación. El fluido es alimentado por gravedad, directamente de la fosa al pozo, así el fluido se desplaza a través del espacio anular que rodea la tubería hasta alcanzar el fondo de la perforación, atrapando a su paso fragmentos y cortaduras, las cuales mediante succión penetran a la tubería a través de la barrena y son transportados a la fosa de sedimentación. En la figura 3.11 se esquematiza el sistema de circulación inversa.

PERFORACION A ROTACION CON AIRE

El proceso que se utiliza es prácticamente el mismo que el descrito en el sistema rotatorio de circulación directa, el único cambio que se tiene es la utilización de aire como fluido de perforación.

En este método en lugar de utilizar una bomba para manejo de lodos, se debe contar con un compresor, mangueras con conexiones de alta presión y una bomba de pistones que permita incluirle agua-espumante al aire utilizado durante el proceso.

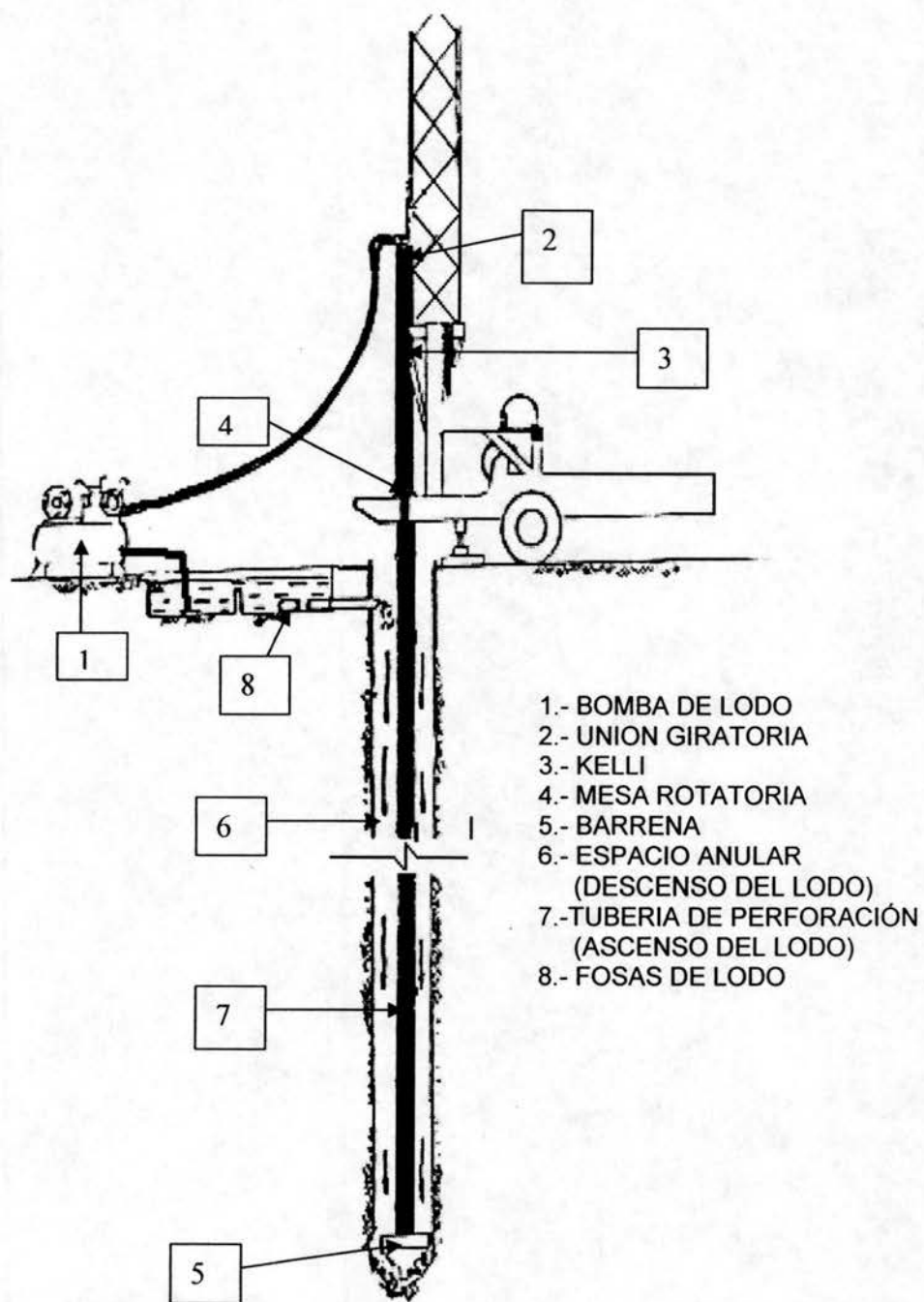


Fig. 3.11 Esquema del sistema a circulación inversa.

En este sistema se hace circular aire a presión por la tubería de perforación el cual escapa por las aberturas del barreno y sube por el espacio anular que rodea a la tubería.

El aire que se desplaza a gran velocidad dentro del anillo arrastra los fragmentos hasta la superficie.

Como el aire no proporciona la acción de soporte de las paredes, como lo hace un lodo, puede ser utilizado únicamente en formaciones que se sostengan aun después de ser perforadas y no puede utilizarse en arenas, materiales sueltos y en todos aquellos que no presenten determinado grado de cementación.

Es muy importante hacer notar que este método es particularmente útil en lugares en los que se tienen problemas de abastecimiento de agua o en formaciones que presentan pérdidas totales de otro fluido de perforación que obligan a un gasto excesivo de bentonita y agua.

PERFORACION CON MARTILLO NEUMATICO DE FONDO

La perforación con esta herramienta es una variante de la perforación con aire, pero presenta mayores ventajas, sobre todo en formaciones con tendencia a desviar la herramienta o de una dureza tan alta que prolongue demasiado los tiempos de penetración.

El sistema cuenta con un pistón que golpea directamente sobre la broca y prácticamente la sigue dentro de la perforación.

El aire necesario es suministrado a través de la tubería de perforación y proporciona en este caso, la potencia y el fluido para el acarreo y desalojo de las partículas cortadas hacia la superficie.

Con una buena operación y supervisión de los trabajos de perforación, es posible considerar que la perforación con neumático es la más rápida, tratándose de formaciones compactas o duras, sin embargo se utilizan herramientas y equipo de alto valor, así como espumantes adecuados, por lo que los costos de perforación se incrementan.

3.2 ELECCION DEL EQUIPO DE PERFORACION

De los numerosos métodos de perforación, no existe uno del cual se pueda afirmar que es el mejor, sino que cada uno de ellos presenta ventajas y desventajas. Existen varios factores que inciden en la elección del equipo de perforación, entre los más importantes se encuentran los siguientes:

- a) El diámetro del pozo
- b) La profundidad del pozo
- c) El tipo de formaciones geológicas a ser penetradas

Este último factor es uno de los más importantes, ya que si se conocen las características geológicas del lugar, es posible planear y proyectar con anticipación el método de perforación más conveniente.

Para elegir el método de perforación, se debe considerar el tipo de rocas que se van a perforar como un factor de gran importancia, ya que dependiendo de su origen, se tendrá un mayor o menor grado de dificultad para perforarlas. Atendiendo a lo anterior, a continuación se describen brevemente algunos aspectos de acuerdo al origen de las rocas a perforar.

1. - En rocas ígneas.

Este tipo de rocas, debido a su dureza y abrasividad, son particularmente difíciles de perforar, máxime si se encuentran en estado inalterado o poco intemperizadas. Esta característica de las rocas ígneas hacen que la vida útil de las brocas sea muy corta y además obliga a que la velocidad de penetración sea muy baja.

Otro aspecto que hay que considerar para perforar en este tipo de rocas es que por lo general se encuentran intercalados estratos de tobas arenosas y clásticos volcánicos lo que ocasiona caídos en los pozos, los cuales pueden provocar atrapamientos de la herramienta de perforación.

Por otro lado, el fracturamiento y buzamiento de las coladas basálticas y las fallas que presentan, ocasionan desviaciones en la perforación y reducen su rendimiento. Aunado a esto, pueden existir grandes pérdidas del fluido de perforación.

2. - En rocas sedimentarias.

Debido a que este tipo de rocas se forman por la acumulación de sedimentos, sus características dependen de una serie de factores, como por ejemplo: las características físicas y

químicas de las rocas que las forman, así como de factores externos como la presión a que están sometidas, etc. Por lo tanto este tipo de rocas presentan un rango de perforabilidad muy grande, de tal manera que se pueden encontrar rocas muy difíciles de perforar por su dureza y abrasividad como en el caso de algunas areniscas, y en otros casos se pueden encontrar rocas como las lutitas en las cuales la dificultad no estriba en su dureza o abrasividad sino en la expansión que sufren al hidratarse.

Otra característica que presentan algunas de estas rocas es la falta de cementante, lo cual provoca caídos y cavernas aumentando el riesgo de atrapar la herramienta de perforación.

Además de los problemas propios de origen, las rocas sedimentarias como las calizas, areniscas y lutitas se presentan en alternancia, con diferente grado de fracturación y deformación geológica, lo que incide en forma importante en el grado de dificultad de la perforación.

En rocas calcáreas, el fenómeno kárstico llega a ocasionar grandes pérdidas del fluido de perforación, que obliga al uso del aire como fluido.

3. - En rocas metamórficas

En este tipo de rocas su dureza y sus características de perforabilidad están directamente relacionadas con su composición mineral, el tamaño de los cristales, grado y tipo de alteración y/o recristalización, así como de la dirección de los esfuerzos a que fueron sometidos, ya que sus minerales se orientan en una dirección que puede no resultar favorable en la perforación.

Además del análisis de los factores geológicos mencionados, se recomienda realizar el análisis de los siguientes factores, ya que la selección del equipo de perforación no se limita únicamente a la capacidad del equipo básico sino que también deben analizarse los elementos complementarios que la conforman tales como: bomba de lodos, tubería de perforación, abertura de la rotaria, unión giratoria, lastra barrenas, rimas, polea viajera, llaves de apriete, etc., con finalidad de que la elección sea congruente en su conjunto. Los factores adicionales a considerar son los siguientes:

a) Analizar cada una de las partes diseñadas del pozo, como por ejemplo la profundidad y diámetro de la perforación; los diámetros, espesores y longitudes de las tuberías de ademe, tanto lisas como ranuradas, esto permite definir la capacidad de los malacates, polea viajera y diámetro de las brocas.

b) Es muy importante hacer una inspección del lugar donde se va a perforar el pozo, para así tomar en cuenta una serie de factores que inciden en los trabajos de perforación, como los siguientes:

1. Líneas de energía eléctrica.
2. Líneas de agua potable.
3. Líneas de drenaje.
4. Líneas telegráficas y telefónicas.
5. Calles y callejones muy estrechos.
6. Abastecimiento de agua para la perforación.
7. Accidentes topográficos y geológicos.

Tomando en consideración lo anteriormente expuesto se puede llegar a la selección del equipo más apropiado para la perforación, sin olvidar las recomendaciones y catálogo del fabricante.

3.3 COLOCACION DE ADEMES

La instalación de la rejilla constituye uno de los elementos esenciales de la construcción de un pozo. Los procedimientos empleados para instalar las rejillas varían según el método que se haya utilizado en su perforación.

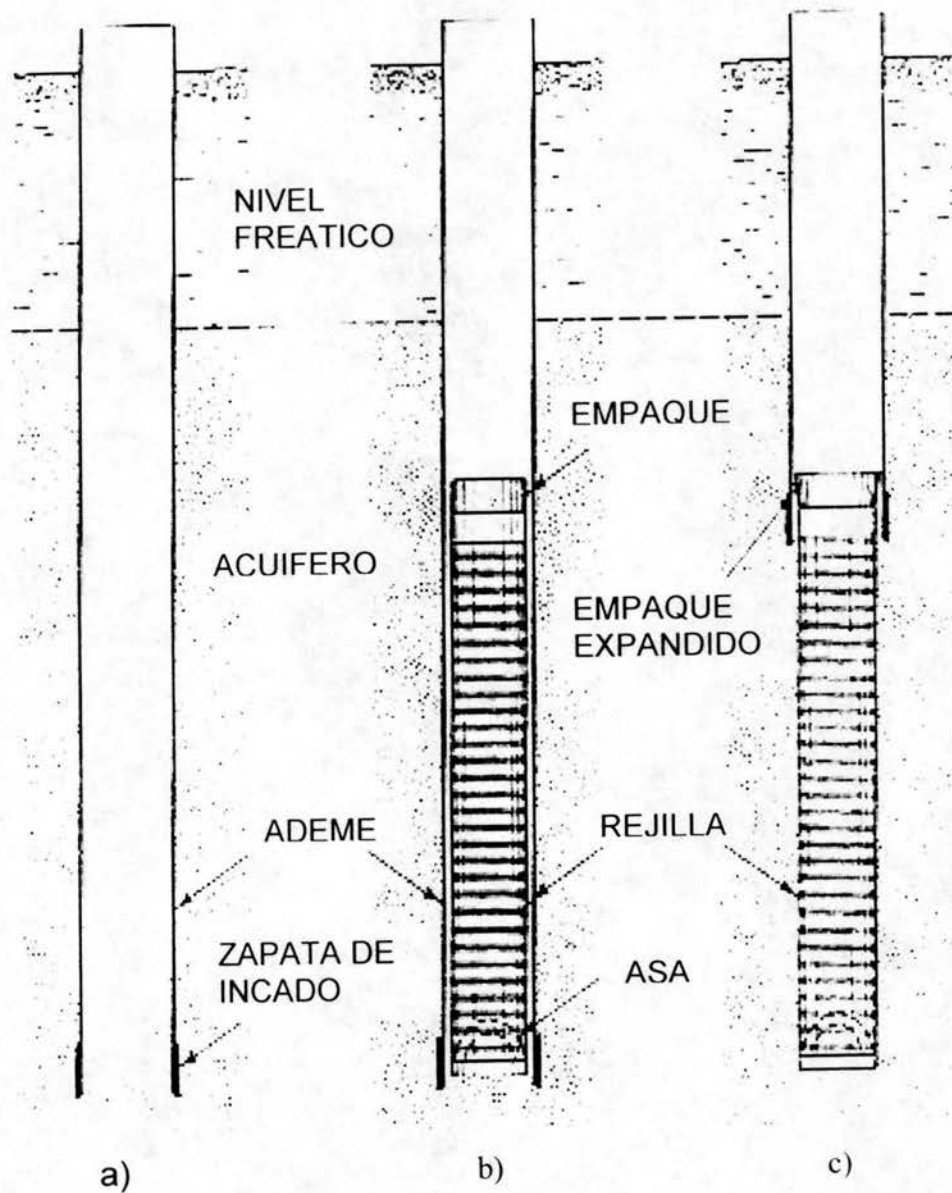
Se pueden distinguir dos metodologías para la colocación de ademes, dependiendo si el pozo es de desarrollo natural o de desarrollo artificial, este último es el que lleva un filtro de grava.

Dentro de los pozos de desarrollo natural existen diversos métodos de colocación de ademes, el más utilizado es el denominado de "retracción de ademe". El procedimiento consiste en hacer descender el ademe liso hasta la profundidad total del pozo, por dentro de éste se introduce la rejilla tipo telescópico. Posteriormente se retrae el ademe en una distancia suficiente para que deje expuesta la rejilla en el intervalo productor del acuífero. En la figura 3.12 se esquematiza este método.

Las rejillas tipo telescopio se fabrican del tamaño exacto que permita introducirla por dentro de la tubería estándar del diámetro correspondiente, tal como en un telescopio, por ejemplo una rejilla de un diámetro telescópico nominal de 6", tiene el tamaño justo para ser introducida en un tubo estándar de 6". Cabe mencionar que en este tipo de rejillas el fabricante provee que quede un pequeño espacio anular entre la rejilla y la tubería de ademe, para evitar que la rejilla se quede atrapada. La tabla 3.1 muestra los diámetros nominales y los diámetros exteriores reales de este tipo de tuberías telescópicas.

Para sellar el extremo superior de la rejilla con el ademe se coloca un empaque que impide la entrada de arena durante el bombeo.

El ademe puede retraerse por cualquiera de los métodos comúnmente utilizados, por ejemplo puede jalarse utilizando el golpeteo de las herramientas de perforación o utilizando el cable de ademado de la máquina de perforación a percusión.



- Se inca el ademe liso.
- Se introduce la rejilla tipo telescópico en el ademe liso.
- Se retrae el ademe liso, dejando expuesta la rejilla

Figura 3.12 Método de retracción para la instalación de ademe liso y ranurado.

DIÁMETRO NOMINAL (PULGADAS)	DIAMETRO EXTERIOR REAL (PULGADAS)
3	2 ³ / ₄
4	3 ³ / ₄
5	4 ³ / ₄
6	5 ⁵ / ₈
8	7 ¹ / ₂
10	9 ¹ / ₂
12	11 ¹ / ₄
14 OD	12 ¹ / ₂
16 OD	14 ¹ / ₄
18 OD	16 ¹ / ₄
20 OD	18 ¹ / ₄
24 OD	22 ⁵ / ₈
30 OD	27 ¹ / ₄
36 OD	32

OD = DIAMETRO EXTERIOR

Tabla 3.1 Diámetros nominales y diámetros reales de las tuberías tipo telescópico.

Aunque el método telescópico para instalar rejillas se desarrolló originalmente para adaptarse a un tipo particular de perforación de pozos (al de percusión), se ha convertido en el sistema más práctico para aplicarlo a cualquier pozo, no importa que método de perforación se haya utilizado.

Para colocación de ademes en pozos de desarrollo artificial se utiliza también el sistema telescópico de retracción de ademe, la diferencia principal consiste en el hecho que la sarta de ademe liso y rejilla no se puede descansar en el fondo del pozo en tanto no se haya colocado el filtro de grava, ya que éste proporciona el apoyo lateral necesario para evitar la torcedura del pozo.

Para centrar el ademe y la rejilla se hace uso de guías centradoras, como se ilustra en la figura 3.13.



Fig. 3.13 Instalación de rejilla utilizando guías centradoras.

3.4 CEMENTACION Y CONTRAADEME

No obstante que el ademe superior del pozo es ciego, es conveniente sellar la parte superior del pozo para evitar la contaminación de los acuíferos someros y que éstos a su vez contaminen los profundos o por explotar.

Para evitar este efecto indeseable se aconseja instalar una tubería ciega de mayor diámetro en la parte superior del pozo, llamado contraademe y rellenar con una mezcla de agua-cemento el espacio anular delimitado por formación y el contraademe. Al relleno de la mezcla agua-cemento se le llama cementación. La cementación y el contraademe se ilustran en la figura 2.4.

Los espacios anulares entre la perforación y el contraademe y entre éste y el ademe se recomienda sean del orden de 3 pulgadas y siempre estos espacios deberán permitir, por un lado la construcción adecuada de la cementación y por otra la correcta colocación del filtro de grava.

Se recomienda prolongar el contraademe y la cementación hasta una profundidad en la que se encuentre una formación impermeable, para que de esta manera cumpla su cometido.

3.5 COLOCACIÓN DEL FILTRO DE GRAVA

Existen dos aspectos fundamentales que se deben evitar en la colocación del filtro de grava, por un lado se debe impedir la separación de las partículas gruesas de las finas que conforman la mezcla graduada y por el otro se debe evitar el que presenten obstrucciones del material que provoquen oquedades o vacíos a lo largo del filtro.

Para lograr lo anterior se dispone de diversos métodos en la colocación del filtro de grava, dependiendo de la profundidad del pozo.

Un primer método consiste en la utilización de una sarta de tubería de 5 cm o más de diámetro, la cual se introduce por el espacio anular que se va a rellenar con grava. Para la alimentación de la grava se utiliza un embudo. Conjuntamente con la grava se abastece suficiente agua para distribuir y evitar que la grava deje vacíos en el espacio anular. Una variante de este método consiste en bombear la grava a través de la tubería conductora, en lugar de introducirla por gravedad mediante corriente de agua.

Paulatinamente el embudo se va levantando a medida que el material del filtro va envolviendo a la rejilla. En este caso la sarta de tubos sirve para palpar el nivel superior de la grava y de esta manera saber cual es la profundidad que se ha alcanzando.

Este sistema es práctico en aquellos pozos moderadamente profundos.

Para el caso de pozos profundos existe un método que consiste en bombear el material del filtro de grava.

Conforme la arena y el agua se bombean dentro del espacio anular que rodea a la rejilla, el agua que retorna pasa a través de la tubería.

Existen métodos de colocación más sencillos, como los que a continuación se describen:

Si la perforación se realiza con equipo rotatorio, antes de iniciar el engravado se introduce la tubería de perforación hasta el fondo del pozo, y a través de ella se hace circular el agua limpia, al mismo tiempo se van depositando las gravas, esto tiene como finalidad desalojar los finos que se introducen junto con las gravas. A medida que las gravas vayan bajando, la tubería de perforación se irá elevando, cuidando siempre que su descarga se encuentre entre 1 y 3 m abajo del nivel del filtro.

En el caso de que la perforación se realice con equipo de percusión, el desalojo de los finos se efectuará al mismo tiempo que el engravado, por medio de cuchareo.

Una vez que el espacio anular ha sido llenado hasta la superficie, para eliminar "puentes" y formar correctamente el filtro, es indispensable agitar el pozo. Esta operación se puede realizar mediante el empleo de un pistón o por medio de la utilización de aire comprimido. Si opta por la primera opción deberá pistonearse el pozo comenzando por el fondo del pozo y finalizando hasta alcanzar el nivel estático o el nivel inferior de la tubería lisa, dicho pistoneo se hará en tramos aproximados de 10 m y con una hora de duración.

Si la decisión favorece al empleo de aire comprimido, se utilizarán dos tuberías; una de inyección y otra de descarga. La capacidad de la fuente de aire comprimido deberá ser suficiente para que al momento de efectuar la inyección de aire, se provoque en la descarga una emulsión de agua-aire que provoque el arrastre de los materiales finos que se encuentren en el interior del pozo. Las tuberías se harán ascender del fondo del pozo a la superficie a medida que el agua expulsada vaya saliendo limpia y libre de sólidos en suspensión; continuándose así hasta llegar al contacto de la tubería ranurada con la tubería lisa.

En ambos casos a medida que las gravas vayan descendiendo por el espacio anular, hecho provocado por la agitación, éstas deberán de reponerse hasta alcanzar el nivel del terreno y se estabilice con él.

Los materiales seleccionados para formar el filtro deberán revolverse previamente a su colocación en el espacio anular. Para vaciarlos se utilizarán palas manejadas a mano. Cabe mencionar que al ser colocado el material en el espacio anular, su volumen merma aproximadamente un 20%, lo cual debe ser considerado en su cuantificación.

3.6 COLOCACION DEL TAPON EN EL FONDO DEL POZO

Este tapón consiste en depositar en la parte inferior del ademe una lechada agua-cemento, se recomienda que ésta ocupe un volumen entre 1.0 y 1.5 m de dicha tubería. El colado se realiza preferentemente en la superficie, esto es, antes de introducir la tubería de ademe, aunque también puede efectuarse dentro del pozo una vez que ha sido colocada la tubería de ademe.

La finalidad del tapón es evitar los arenamientos originados por la turbulencia del bombeo en la parte inferior del ademe, así como forzar la entrada de los finos por las ranuras del cedazo durante el desarrollo del pozo. En la figura 3.14 se muestra la ubicación del tapón de fondo.

Es importante mencionar, que en ningún caso se deberá soldar placas de acero o cortar gajos en el extremo del ademe, como sustitución del tapón de cemento, en virtud de que el empleo de esta técnica impide la profundización del pozo, en caso de ser necesario; caso contrario ocurre con el tapón de cemento el cual es fácilmente perforable.

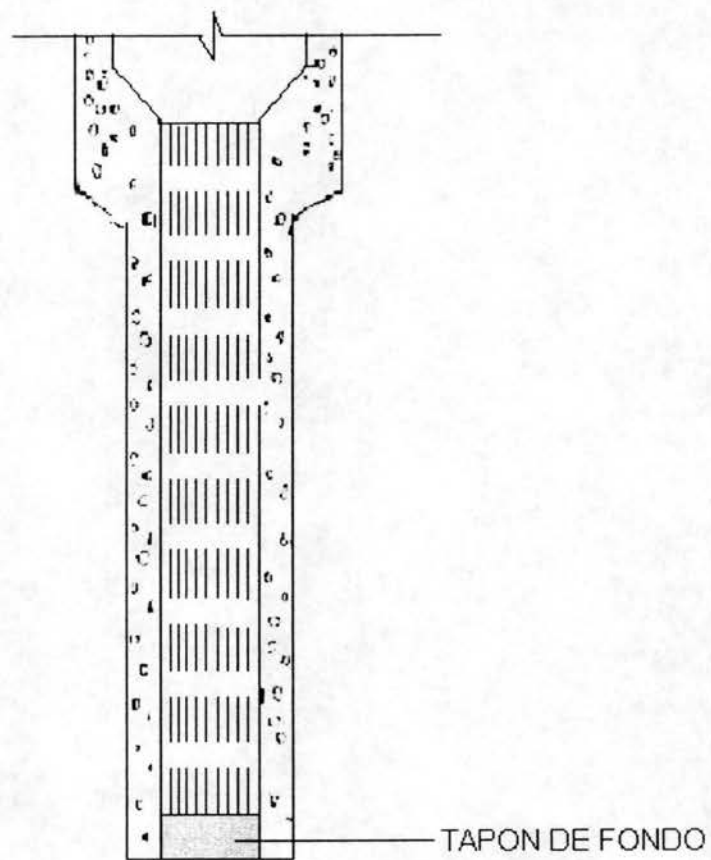


Figura 3.14 Tapón de fondo

3.7 PRUEBA DE VERTICALIDAD

Durante la perforación de un pozo existen factores que provocan que ésta pierda la verticalidad y el alineamiento. Estos factores son los siguientes: las características del material que se perfora, en el caso de la utilización de perforación rotatoria la fuerza de empuje aplicada a la tubería de perforación, otro factor que interviene es el alineamiento de las tuberías de ademe que se utilizan.

De los problemas de falta de verticalidad y alineamiento que se pueden presentar al perforar un pozo profundo, es el segundo el que ocasiona mayor problema, ya que de éste depende la instalación de una bomba vertical tipo turbina, ya que si el pozo se encuentra torcido, después de cierto límite, la bomba no se podrá introducir, impidiendo que se coloque al nivel deseado. Si el pozo se encuentra recto pero no vertical, el equipo de bombeo se puede instalar, aunque esto puede afectar la operación y vida útil de la bomba.

Existen varios procedimientos para determinar la verticalidad y alineamiento de un pozo. Aunque si bien es cierto que no todos proporcionan la misma exactitud, cada uno de ellos puede ser útil en determinados casos y bajo ciertas circunstancias.

Un primer método de comprobación que puede ser utilizado cuando el nivel estático está lo suficientemente profundo, es observar desde la boca del pozo al interior, auxiliándose de una linterna o utilizando un espejo que refleje los rayos del sol al interior del pozo y comprobar si la imagen que se observa es un círculo o un óvalo. En el caso de que la imagen sea un círculo se puede afirmar que el pozo se encuentra vertical, en caso de que sea un óvalo el pozo estará desviado.

Un segundo método de mayor exactitud y que utiliza herramientas muy elementales es el propuesto por Johnson. Básicamente consiste en calcular la desviación producida a una profundidad determinada, en función a la que se produce en la boca del pozo para un cable fijo a una altura conocida por encima del pozo. En la figura 3.15 se observa el dispositivo descrito por Johnson, en el cual "h" es la altura del centro de la polea-guía al extremo superior del tubo de ademe, se recomienda que esta distancia sea exactamente de 3.0 m; "n" es la desviación en la boca del pozo y "p" la profundidad a la que se coloca la plomada y que desciende a lo largo del pozo.

Por semejanza de triángulos se tiene:

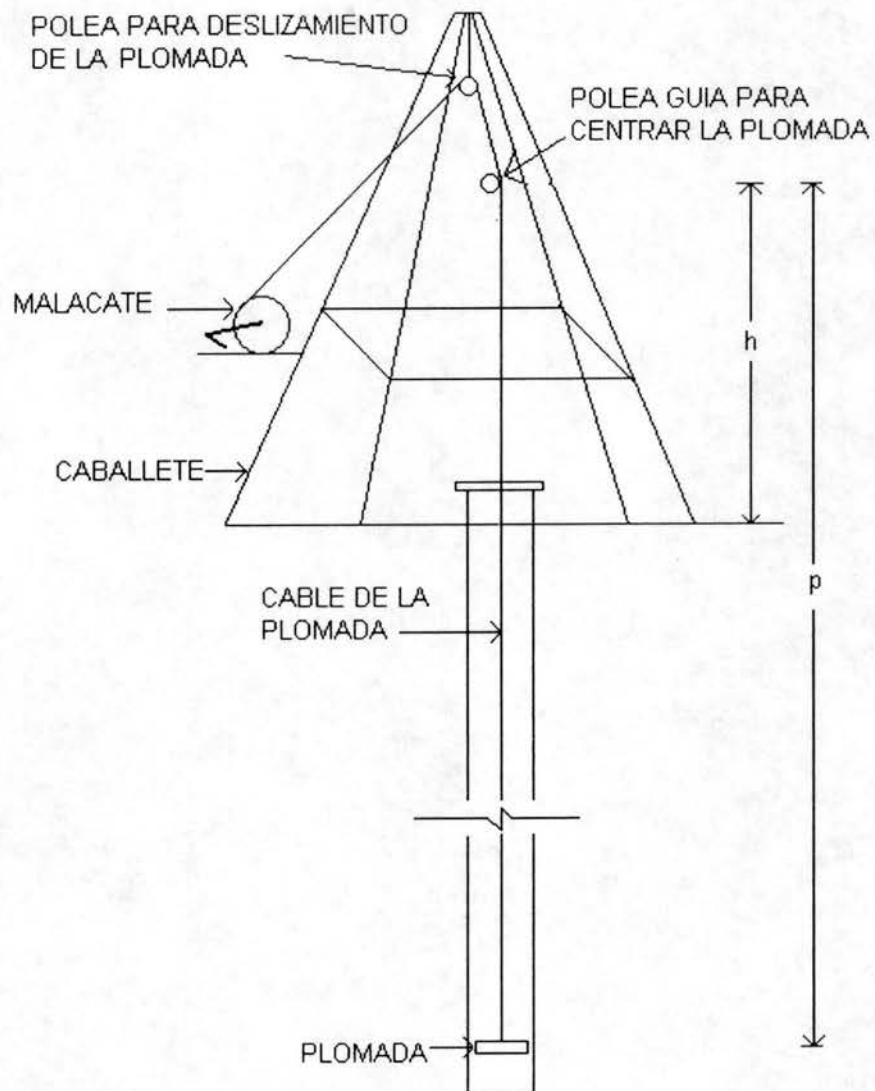
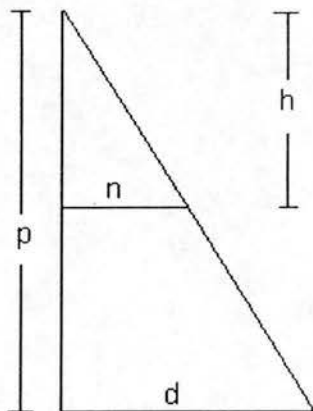


Figura 3.15 Dispositivo para realizar la prueba de verticalidad.



$$\frac{h}{p} = \frac{n}{d}$$

despejando "d", se obtiene la desviación a la profundidad "p"

$$d = \frac{pn}{h} = \text{desviación a la profundidad "p"}$$

El diámetro de la plomada es de 6.5 mm menor que el diámetro del pozo. La desviación "n" se puede medir fácilmente si en la boca del pozo se coloca una lamina de plástico transparente, graduada con círculos concéntricos, la cual se centra perfectamente en el pozo. Esta lamina tiene una ranura para que se pueda quitar y poner con el cable de la plomada dentro del pozo, como se muestra en la figura 3.16.

El procedimiento de la prueba es el siguiente: primeramente se sitúa el cable exactamente en el centro del pozo, con el auxilio de la polea-guía. Después y sucesivamente se va introduciendo la plomada y se mide para cada tramo, por ejemplo cada 3.0 m las desviaciones n_i que se van produciendo en la boca del pozo. Por medio de la fórmula se calculan las desviaciones d_i a las distintas profundidades y con ellas se puede dibujar el grafico de la figura 3.17.

Comúnmente se acepta que un pozo esta dentro de un rango aceptable de alineación si por él puede pasar un tubo calibrador de 12 m de longitud y con diámetro de 12.7 mm menor que el diámetro interior del pozo.

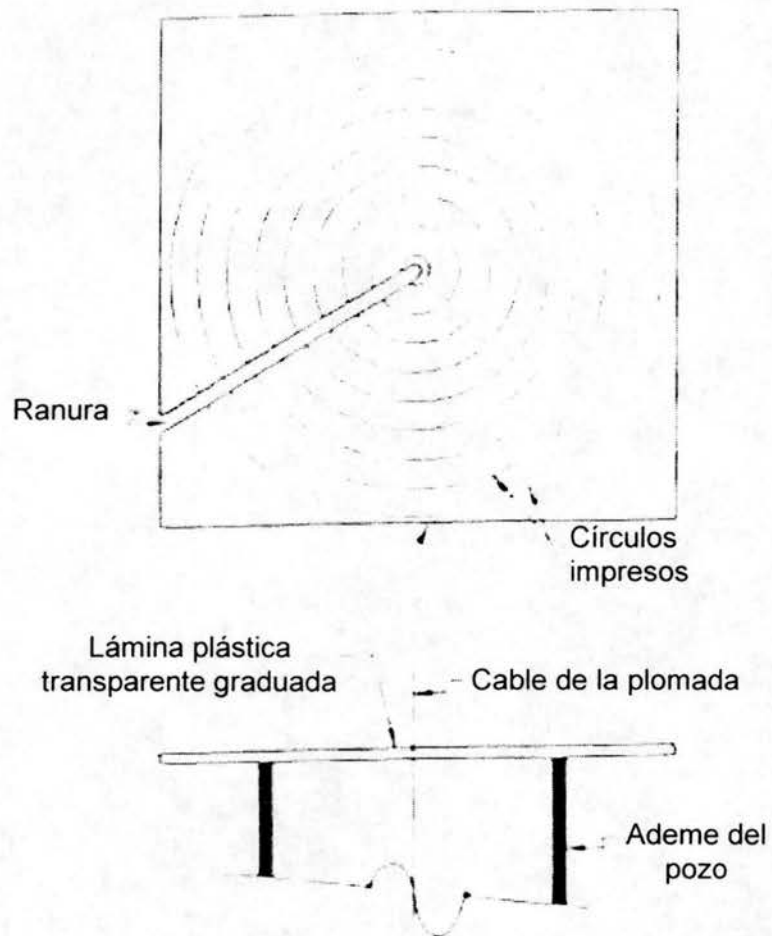


Figura 3.16 Lámina graduada para medir la desviación "n" del cable de la plomada.

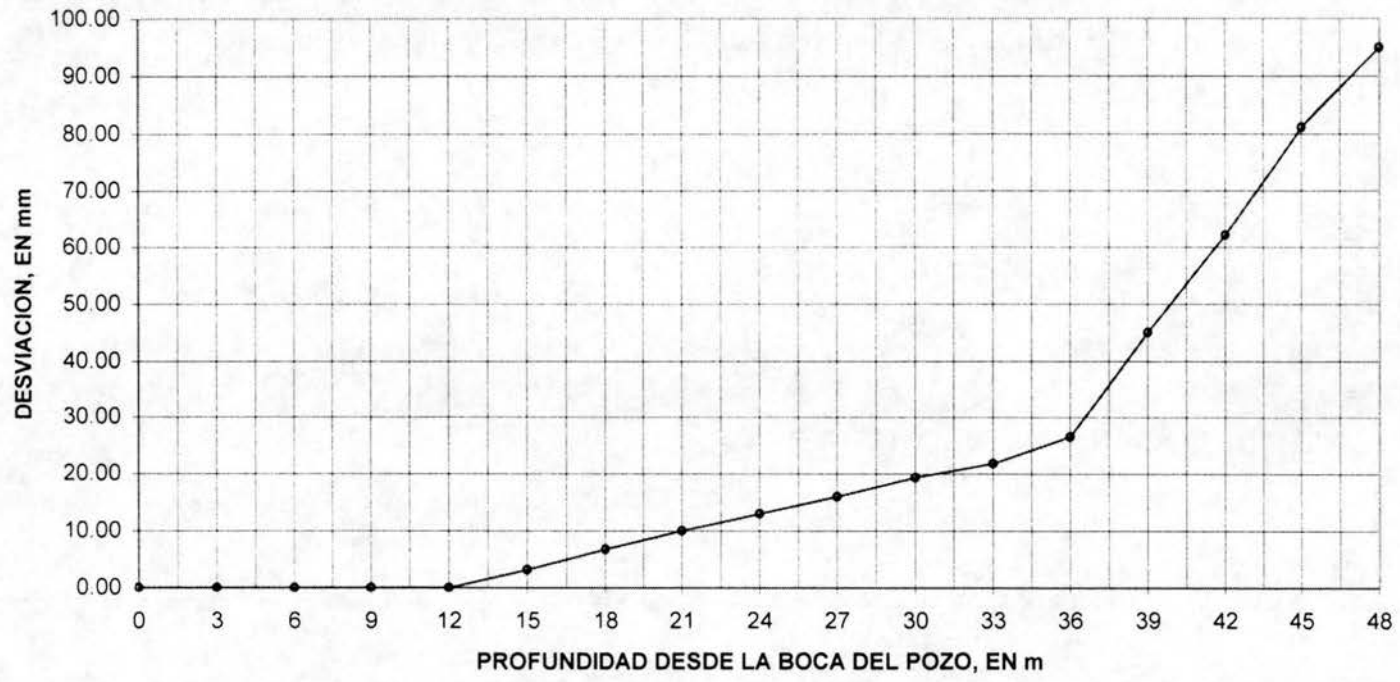


Figura 3.17 Gráfica de verticalidad

A continuación se presenta un ejemplo de la prueba de alineamiento y verticalidad utilizando el método de Johnson.

En la siguiente tabla se muestran las desviaciones producidas en la boca del pozo y sus respectivas desviaciones a distintas profundidades.

DISTANCIA DESDE LA BOCA DEL POZO A LA PLOMADA EN (m)	DESVIACIÓN EN LA BOCA DEL POZO (n) EN (mm)	DESVIACIÓN $d=pn/h$ EN (mm)
0.00	0.00	0.00
3.00	0.00	0.00
6.00	0.00	0.00
9.00	0.00	0.00
12.00	0.00	0.00
15.00	0.75	4.50
18.00	1.08	7.56
21.00	1.62	12.96
24.00	1.69	15.21
27.00	2.03	20.30
30.00	2.45	26.95
33.00	2.54	30.48
36.00	2.74	35.62
39.00	3.18	44.52
42.00	3.81	57.15
45.00	4.76	76.16
48.00	5.43	92.31

Con los valores de las columnas 1 y 3 se obtiene la gráfica de la figura 3.17, en ésta se observa que el pozo presenta una desviación a los 12 m, a pesar de esto el calibrador pasa libremente, pero a los 36 m se presenta otra desviación mayor por la cual dicho calibrador ya no pasa.

3.8 DESARROLLO Y AFORO

DESARROLLO

Es la operación que se efectúa para eliminar los materiales finos del acuífero, se realiza al concluir la cementación del pozo y la colocación del filtro de grava, si éste es el caso.

Todas las operaciones que se hacen al perforar un pozo, alteran las condiciones naturales del terreno perforado y dañan con bentonita, arcilla y material triturado los acuíferos, de tal manera que provocan una reducción de la conductividad hidráulica en la cercanía del pozo, debido a la obturación de la porosidad.

Por lo tanto el desarrollo siempre se hace con la finalidad de obtener los siguientes objetivos:

- a) Reparar el daño que se hace a la formación natural con las operaciones de perforación, de manera que se restablezcan lo más posible las condiciones hidráulicas naturales.
- b) Alterar las características físicas básicas del acuífero para inducir un aumento en la porosidad y la conductividad hidráulica en las cercanías del pozo de manera que el agua pueda fluir lo más libremente hacia el mismo.
- c) Estabilizar la formación granular alrededor del cedazo o rejilla de manera que se obtenga agua libre de arena.

En la figura 3.18 se observa una formación de desarrollo natural con un aumento de la conductividad hidráulica alrededor de la rejilla.

Entre los métodos más usados para el desarrollo de pozos se encuentran los siguientes:

1.- Desarrollo por sobrebombeo.

Es el método más sencillo para eliminar los finos de la formación acuífera. Consiste en bombear el pozo con un caudal mayor al que se ha de extraer al ponerlo en servicio. Este método presenta el inconveniente de que como el flujo va en un solo sentido, los granos finos pueden acumularse cerca de la rejilla, entre los granos gruesos, con lo cual el desarrollo no es total.

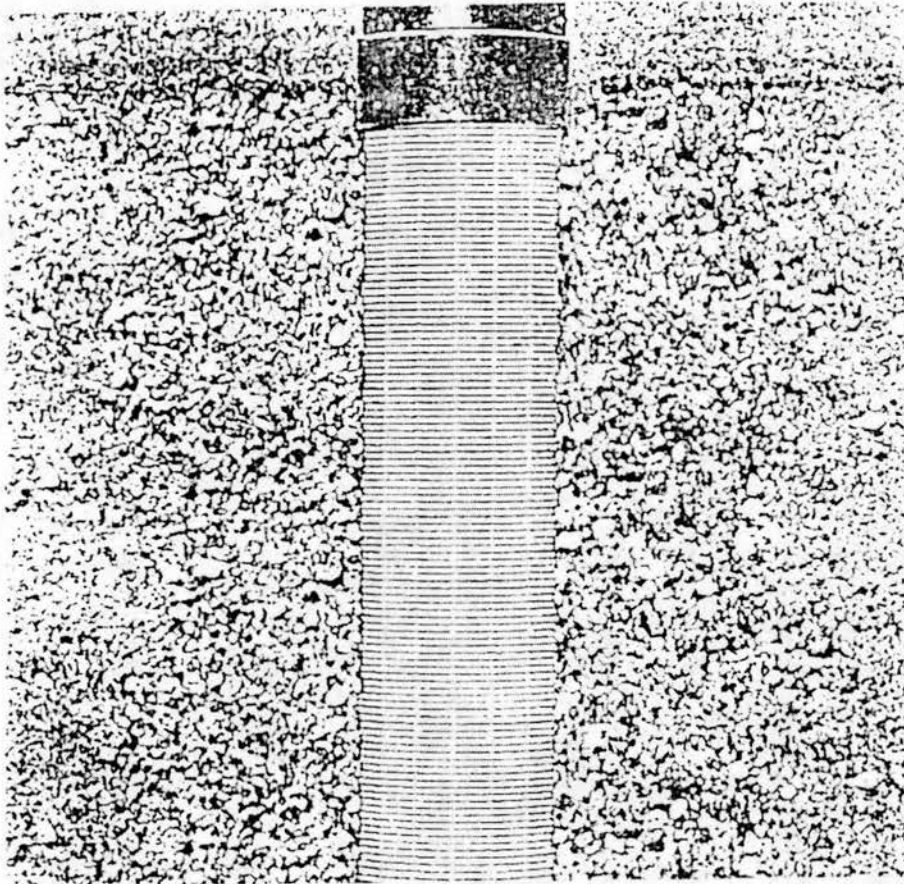


Figura 3.18 Formación en la que se observa el aumento de la conductividad hidráulica debido al desarrollo del pozo.

2.- Agitación mecánica.

Consiste en desarrollar la formación acuífera por medio de la agitación del agua dentro del pozo, esta agitación se da con desplazamientos de un émbolo hacia arriba y hacia abajo, por dentro de la tubería, a manera de un pistón dentro de un cilindro. Con el empleo de este método se logra que el flujo del agua se invierta, esto es va del pozo al acuífero y del acuífero al pozo. Posteriormente se extraen los finos que hubiesen penetrado al pozo, mediante una cubeta o cuchara.

3.- Agitación con aire.

Este método consiste en la inyección de aire, proveniente de un compresor, por una tubería de pequeño diámetro que se denomina línea de aire, la cual va por dentro de otra tubería de mayor diámetro que se denomina tubo eductor. Con la descarga cíclica de aire a alta presión y posterior bombeo se invierte la dirección del flujo del agua en la formación que circunda al pozo.

4.- Método de contra lavado.

El efecto agitador o la inversión del flujo en este método se logra mediante el bombeo, en forma intermitente, del agua que se encuentra dentro del pozo. El método consiste en iniciar el bombeo del pozo, pero tan pronto como el agua llega a la superficie se debe interrumpir dicho bombeo. De esta manera el agua contenida en la columna de agua cae bruscamente. Este ciclo se repite constantemente. Después de cierto número de ciclos se bombea el pozo para expulsar la arena que hubiese penetrado al pozo a causa de la agitación producida.

5.- Aplicación de chorro de agua a alta velocidad.

Este es quizá el mejor método para desarrollar una formación acuífera, consiste en hacer funcionar un eyector horizontal por dentro del pozo, de tal forma que los chorros de agua a alta velocidad expulsados por éste salgan por las aberturas de la rejilla, provocando un flujo del pozo hacia el acuífero. Para ejercer una acción en toda el área productora, el eyector se va girando lentamente y se sube y se baja a lo largo de la rejilla o cedazo. La enérgica acción de los chorros de agua a alta velocidad que salen por las aberturas de la rejilla, agitan y reacomodan las partículas de la formación que rodean dicha rejilla.

Lo que fundamentalmente se trata de lograr con los distintos métodos de desarrollo, es invertir el flujo a través de las aberturas de la rejilla, para de esta manera reacomodar las partículas de la formación. Al existir flujo en una sola dirección se ocasiona que cierto grupo de partículas se reacomoden en forma de arco, como se muestra en la figura 3.19, que dejan huecos susceptibles de

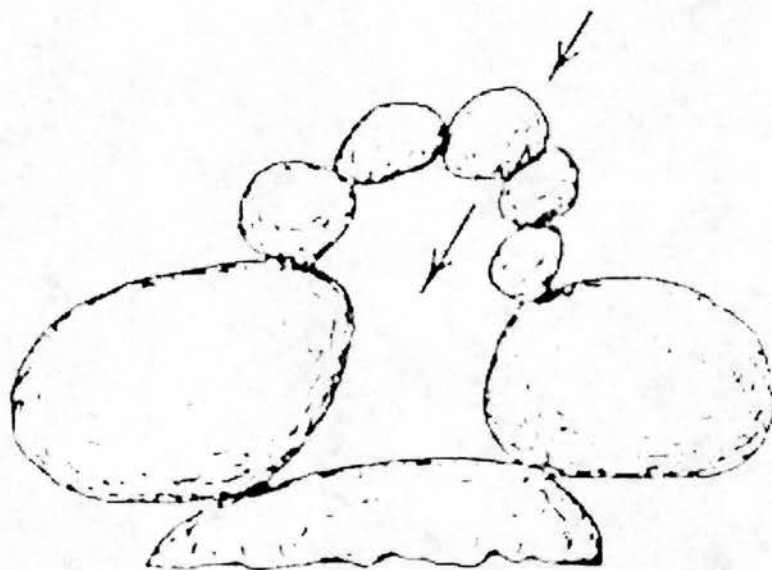


Figura 3.19 Reacomodo de las partículas en forma de arco, debido al flujo en una sola dirección.

llenarse con partículas finas o de que al estar explotando el pozo se rompan y provoquen el reacomodo de la formación con cambios en la conductividad hidráulica.

ESTIMULACIÓN DE ACUÍFEROS

Relacionado con el desarrollo se encuentra la estimulación de acuíferos, que consiste en producir cambios en las características hidráulicas del acuífero con la finalidad de reducir la resistencia al flujo.

Dentro de los métodos más comunes para la estimulación de acuíferos se encuentran los siguientes:

1.- Estimulación por acidificación.

El método consiste en mejorar las características hidráulicas del acuífero, cuando éste está constituido por carbonatos, mediante la aplicación de ácido clorhídrico (ácido muriático) y un inhibidor (para disminuir la tendencia del ácido a atacar el ademe del pozo). El ácido disuelve rápidamente la roca caliza y aumenta la conductividad hidráulica. Es necesario limpiar el pozo lo más pronto posible para evitar que se redepositen el calcio y el magnesio al descender la acidez.

2.- Estimulación con explosivos.

El uso de explosivos es una técnica que se usa más en pozos petroleros que en los de extracción de agua.

El proceso se basa en el rapidísimo aumento de volumen que se produce al ser detonado el explosivo, además de producir un notable desprendimiento de calor. La explosión provoca un aumento del diámetro real del pozo por demolición de material; así como la aparición de fracturas radiales alrededor del lugar de la detonación.

El método de estimulación con explosivos se debe utilizar solamente en acuíferos de roca dura, en los cuales la conductividad hidráulica que predomina es la fisuración; los explosivos pueden resultar contraproducentes en acuíferos que contengan nódulos o capas de arcilla.

3.- Fracturación hidráulica.

Este método de estimulación se utiliza en formaciones acuíferas de roca dura. Consiste en la inyección de agua a alta presión para crear o dilatar las fisuras de la formación; para evitar que ésta se cierren, se les introduce arena o vidrio. Es importante mencionar que el pozo en el cual se va a

realizar este método debe estar muy bien cementado para evitar que el agua se escape a formaciones suprayacentes.

AFORO

Existen diversos dispositivos para medir el caudal de descarga de pozos, la utilización de cada uno de ellos depende de las condiciones particulares que se presenten y de las metas por alcanzar. El aforo es de gran importancia y puede tener los siguientes objetivos:

- a) Estimar la posible descarga de un pozo durante el proceso constructivo del mismo.
- b) Cuantificar los volúmenes de extracción de agua subterráneas y obtener la relación caudal-abatimiento para determinar las características hidráulicas de los acuíferos y/o diseñar el equipo de bombeo y/o saber el grado de eficiencia con que se diseñó o construyó el pozo.

De la estimación razonable del caudal, así como de sus niveles estático y dinámico (de bombeo) depende el éxito de sus posteriores interpretaciones, por lo que es necesario hacer dichas mediciones en forma cuidadosa.

CAPITULO 4 MANTENIMIENTO DE POZOS PROFUNDOS

4.1 MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El alto costo constructivo de pozos nuevos, así como la sobreexplotación de los acuíferos, hacen necesario el realizar ciertas actividades preventivas a fin de hacer más eficiente el uso del agua subterránea y de la infraestructura existente para su extracción.

Hasta hace algunos años, los pozos, después de su construcción, se operaban continuamente y por largo tiempo, hasta que sufrían algún desperfecto, lo que ocasionaba altos costos en su rehabilitación.

La vida útil de un pozo puede ser alargada si se llevan a cabo trabajos de mantenimiento preventivo, dentro de los cuales se pueden considerar: la inspección con cámara de televisión, realizar pruebas de aforo periódicas y medición de los niveles estático y dinámicos; así como la revisión periódica del equipo de extracción.

El mantenimiento periódico que se dé a un pozo puede mejorar su comportamiento y prolongación de su vida útil.

No es posible establecer un sistema de conservación que se adapte a todas las condiciones geológicas, hidráulicas, de calidad del agua y de construcción del pozo. Es el estudio cuidadoso de los antecedentes de funcionamiento de diversos pozos de la región, el que revelará los pasos a seguir para el mantenimiento preventivo.

4.1.1 INSPECCION CON CAMARA DE T.V.

La videograbación del interior de un pozo se realiza con una cámara especial de televisión.

Mediante la inspección con cámara de televisión se determina el tipo y profundidad de los tubos de ademe, la posición del nivel de agua y la profundidad total o de azolvamiento del pozo. Se detectan también los tramos de ademe ranurado o rejilla que se encuentran obstruidos por precipitados químicos (fenómeno conocido como incrustación); se identifican defectos o fallas en la construcción de un pozo, en especial en el colocado y terminación de la tubería de ademe, así como deformaciones o colapsos en la misma. Se obtiene una idea de la verticalidad del pozo, así como la presencia de objetos extraños. Es también de gran utilidad para determinar la posición de herramientas de perforación atrapadas.

Conociendo el interior del pozo se puede tomar decisiones sobre las medidas más convenientes de mantenimiento o rehabilitación del mismo.

El equipo para realizar la inspección consiste en una cámara de televisión adaptada dentro de un cilindro de acero inoxidable de tal manera que puede ser introducida al pozo y operada bajo el agua. El equipo cuenta con una fuente de luz proporcionada por un faro de halógeno de 100 watts, colocado dentro de una bombilla que contiene aceite (este aceite previene el sobrecalentamiento). La fuente de luz se instala delante de la cámara de video, aproximadamente a unos 60 cm. Como se muestra en la figura 4.1.

La cámara de televisión se introduce al pozo por medio de un cable de acero, el cual en su interior incluye un cable coaxial a través del cual se transmiten las señales y la energía eléctrica. El cable es controlado por medio de un malacate eléctrico que se encuentra instalado dentro de una camioneta.

La cámara cuenta con un sistema electrónico que permite decodificar la señal observada por la misma y transmitirla a la superficie.

Dentro de la camioneta, se encuentra la unidad de control que consiste en un sistema electrónico mediante el cual se codifica la señal enviada por la cámara, para ser observada en un monitor y grabada por medio de una videocasetera.

Si se considera que uno de los usos de la inspección con cámara de televisión se da en el mantenimiento preventivo, entonces la videograbación de un pozo se debe realizar desde el momento mismo en el cual se concluye su construcción, con el objeto de conocer la calidad constructiva y terminado del interior del pozo. Afortunadamente en varios organismos oficiales, se ha impuesto como requisito para la entrega del pozo, la revisión de éste mediante una videograbación.

Es recomendable realizar una videograbación del estado en que se encuentra el pozo cada 5 ó 10 años, aprovechando la extracción de la bomba para mantenimiento.

4.1.2 AFOROS

Es necesario que desde el inicio, y a lo largo del funcionamiento de un pozo, se realicen mediciones del caudal que se extrae, ya que esto nos permite detectar la disminución en su producción.

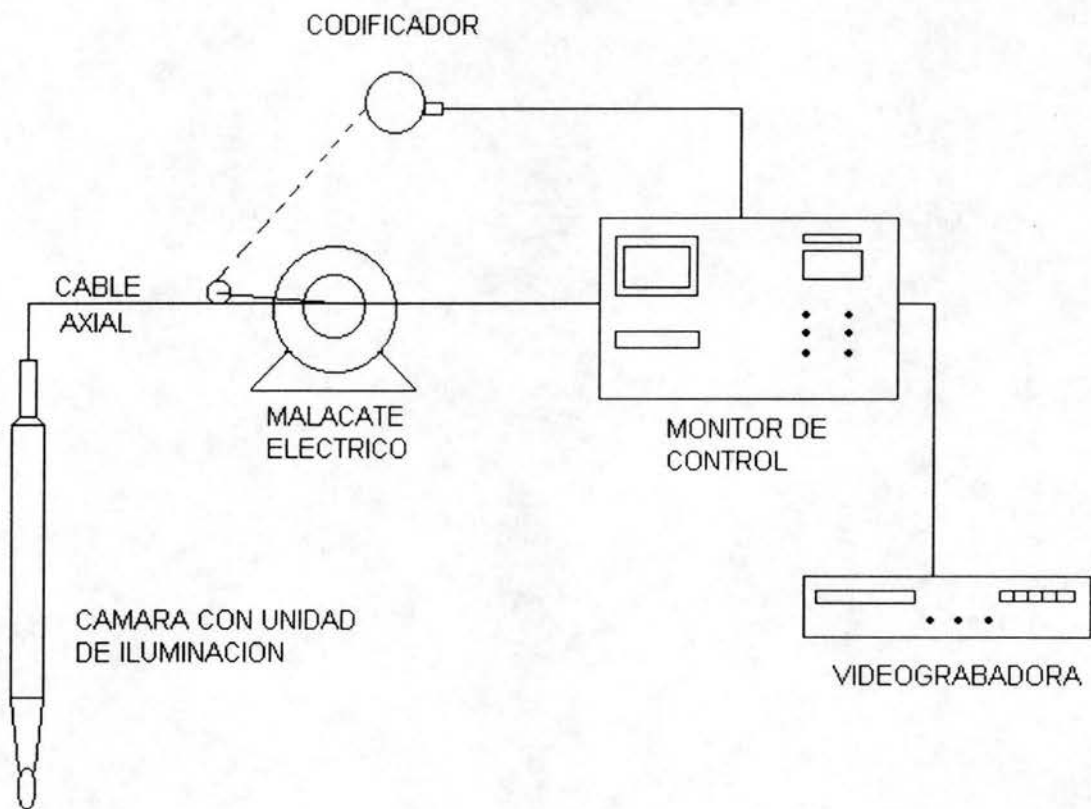


Figura 4.1 Esquema del equipo de inspección con cámara de televisión.

Es importante que la medición del caudal se realice en forma precisa. Un método simple y exacto para determinar la descarga de la bomba consiste en observar el tiempo necesario para llenar un recipiente de volumen conocido.

Para la medición del caudal también puede utilizarse un medidor de flujo comercial.

Un método preciso y muy comúnmente empleado para determinar el gasto de producción de un pozo, es el denominado del orificio calibrado; tiene la ventaja de que el equipo utilizado en la medición es compacto y de fácil instalación y consta de:

- a) Un tubo con una longitud no menor a 1.22m. (48"), el cual se conecta a la descarga por uno de sus extremos, y en el otro extremo se instala un porta orificios. A una distancia no menor de 61cm. (24") del extremo libre se realiza una perforación para conectar un piezómetro como se indica en la figura 4.2.
- b) Un porta orificios que permita con facilidad intercambiar orificios de diferentes medidas.
- c) Orificios de diferentes diámetros interiores.
- d) Una regla graduada.

Para obtener las mayores ventajas de este método se debe considerar lo siguiente:

- a) El tubo de descarga debe estar en posición horizontal y la descarga completamente libre.
- b) Los bordes de los orificios estén biselados preferentemente a 45°, con el borde del filo en dirección aguas arriba.
- c) El orificio debe trabajar siempre lleno.
- d) El diámetro del orificio debe estar comprendido entre $\frac{1}{2}$ a $\frac{3}{4}$ del diámetro del tubo de descarga.
- e) El piezómetro debe estar libre de burbujas y no sobresalir de la superficie interior del tubo de descarga.

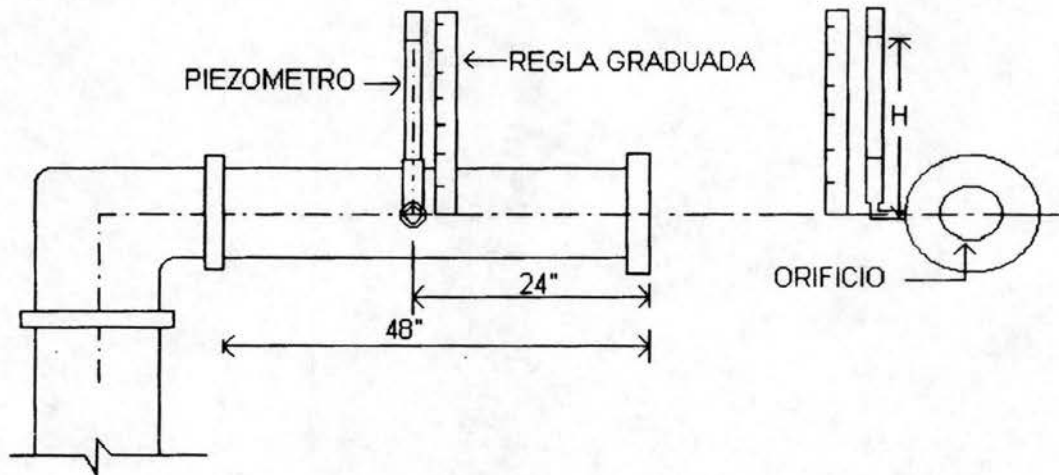


Figura 4.2 Esquema del equipo utilizado para el aforo (método del orificio calibrado).

El caudal a través del orificio se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Q = C_d A \sqrt{2gh}$$

Donde

Q = Caudal de descarga

C_d = Factor de descarga

A = Area del orificio

g = Aceleración de la gravedad

h = Altura del agua en el tubo piezométrico

Los valores de C_d pueden obtenerse de la figura 4.3. El valor de C_d en esta gráfica es válido si "Q" se expresa en m³/seg., "A" en m², "h" en m y "g" en m/seg². Cabe mencionar que existen publicaciones de tablas estándar que dan los valores de la descarga para varias combinaciones de diámetro de orificio, diámetro de tubo y altura piezométrica.

4.1.3 MEDICIONES DE LOS NIVELES ESTÁTICO Y DINÁMICOS

Es necesario llevar una estadística de la posición de los niveles estático y dinámicos durante el funcionamiento de un pozo, para detectar una disminución del espesor del acuífero (debido al descenso del nivel freático) o incrementos en el nivel de bombeo por cambio de las condiciones hidráulicas del pozo o del acuífero.

Los medios más utilizados para realizar estas mediciones son:

1. La sonda eléctrica (medidor eléctrico de profundidades).

Este instrumento es muy manejable y es producido por diversos fabricantes. Básicamente consiste de un electrodo suspendido de un par de alambres aislados y un amperímetro que indica cuando el circuito se ha cerrado, lo cual ocurre al momento en el que el electrodo toca la superficie del agua y circula la corriente eléctrica. El esquema de la sonda eléctrica se muestra en la figura 4.4. La corriente eléctrica se obtiene de una batería. Para facilitar la medición del nivel del agua dentro del pozo (niveles estático y dinámicos) el fabricante adhiere al cable marcas metálicas a intervalos de 1.5 m, las cuales sirven como referencia.

Para una mayor exactitud de las lecturas, el electrodo y el cable se dejan suspendidos dentro del pozo durante el periodo de lecturas. Con lo anterior se logra eliminar la posibilidad de errores en la medición, ya que al subir y bajar el cable se pueden producir dobleces de éste que alteran ligeramente su longitud.

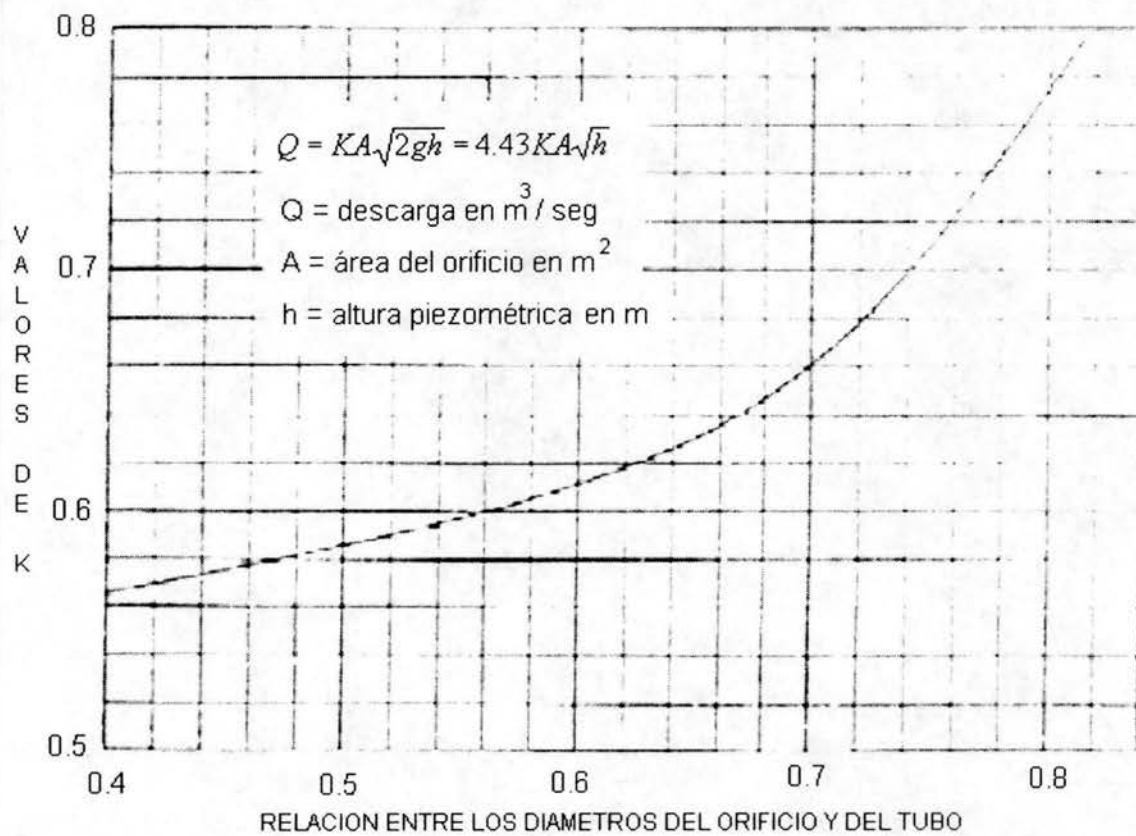


Figura 4.3 Gráfica para obtener los valores de C_d .

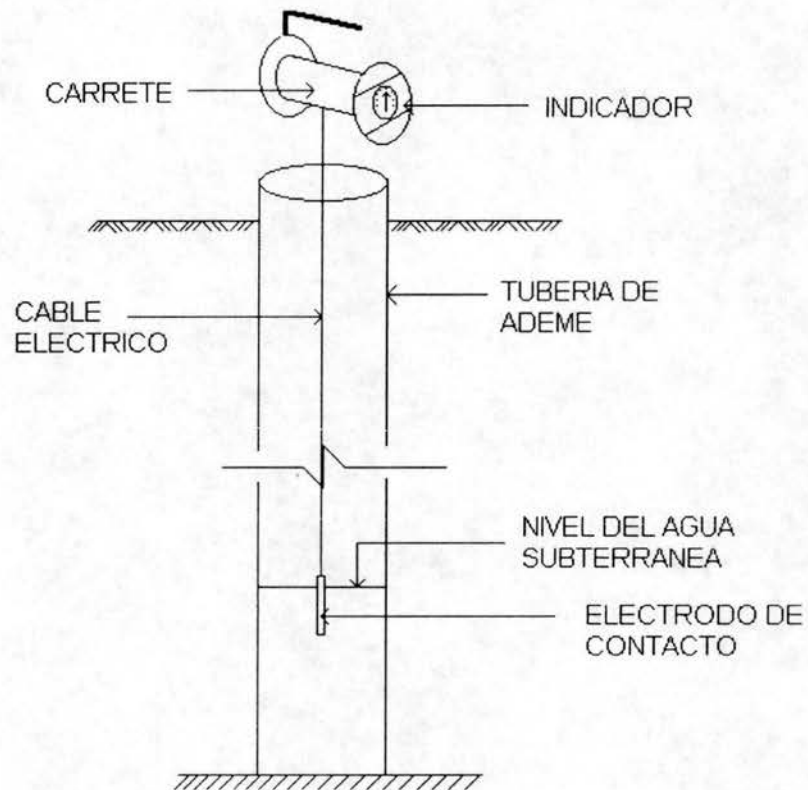


Figura 4.4 Esquema de la sonda eléctrica, también conocido como medidor eléctrico de profundidades.

2. Método de la línea de aire.

La línea de aire consta de un conducto o tubería de pequeño diámetro cuya longitud abarca desde la boca del pozo hasta unos cuantos metros por debajo del nivel al que se supone llegará el nivel del agua durante el bombeo.

Es común utilizar como línea de aire tubería de cobre de $\frac{1}{4}$ " de diámetro. El extremo superior de esta tubería se acondiciona con una válvula y conexiones apropiadas de manera que se pueda utilizar un compresor o un inflador de neumáticos tradicional para introducir aire en la línea. Así mismo se instala un manómetro para conocer la presión del aire dentro del tubo. Lo anterior se ilustra en la figura. 4.5.

Un manómetro graduado en metros de agua resulta más conveniente que uno graduado en kg/cm^2 . Si el manómetro no tiene la graduación de lecturas en metros, basta hacer las conversiones necesarias. Si la graduación es en Lb/pulg^2 , la lectura del manómetro se multiplica por 0.704 y se obtiene la lectura en metros. Si la graduación está en Kg/cm^2 , la lectura del manómetro se multiplica por 10, obteniéndose en ambos casos el valor en metros.

El método se basa en el principio de que la presión de aire requerida para expulsar el agua contenida en la porción sumergida de la línea es igual al peso de una columna de agua de la misma altura. Si esta presión se expresa en metros de agua se puede calcular entonces la profundidad del agua en un pozo.

Los pasos a seguir para llevar a cabo la medición de niveles estático y dinámico, empleando el método de la línea de aire, son los siguientes:

1. Se determina la profundidad exacta que existe entre la boca del pozo o algún otro punto de referencia y el extremo inferior de la línea de aire.

2. Una vez que se haya instalado el manómetro se inyecta aire dentro de la línea. La presión indicada en el manómetro aumenta hasta alcanzar un valor máximo, en el cual se estabiliza, lo que significa que toda el agua ha sido expulsada de la línea de aire. En este instante, la presión dentro del tubo corresponde a una columna de agua cuya longitud es igual a la distancia que hay entre el nivel del agua en el pozo y el fondo del tubo. Si el manómetro indica metros de agua, mostrará directamente la longitud de la porción sumergida de la línea.

Si denominamos "L" a la longitud total de la línea de aire y "l" a la longitud sumergida de esta línea:

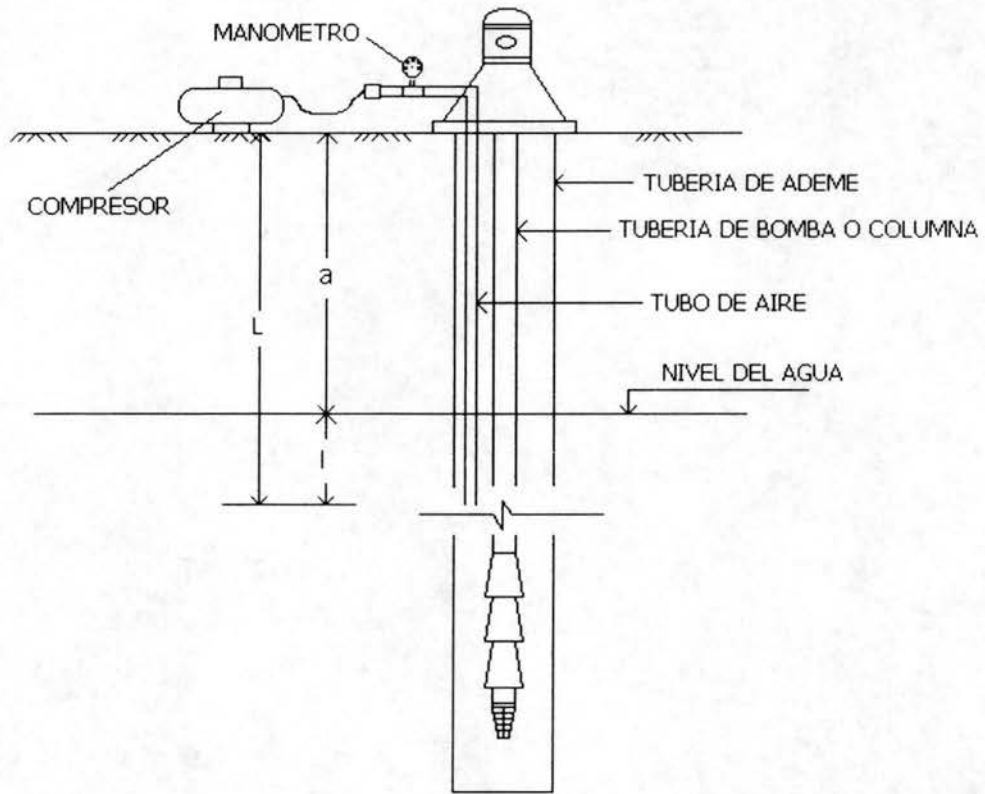


Figura 4.5 Esquema del dispositivo empleado en la medición de los niveles estático y dinámicos, mediante el método de la línea de aire.

$$a = L - l$$

Dónde "a" es la profundidad desde el punto de medición o referencia escogido al nivel del agua dentro del pozo. La medición que se haga antes de arrancar la bomba indicará el nivel estático.

Cualquier cambio en el nivel del agua producirá una diferencia de presión indicada por el manómetro en dos mediciones.

Por ejemplo, si se tiene un pozo en el cual se desea hacer las mediciones del nivel estático y dinámico. La longitud total de la línea de aire desde la boca del pozo hasta su extremo inferior es de 35 m, como se muestra en la figura 4.6. Se desea conocer la posición del nivel estático y la posición del nivel dinámico a los 15 minutos de bombeo.

Para conocer la posición del nivel estático se inicia la inyección de aire y la máxima lectura en el manómetro es de 15 m, entonces el nivel estático es:

$$a = L - l = 35 \text{ m} - 15 \text{ m} = 20 \text{ m}$$

La posición del nivel estático se muestra en la figura 4.6.

Se inicia el bombeo y después de 15 minutos la lectura en el manómetro descendió a 10 m, entonces el nivel dinámico en este instante es:

$$a = L - l = 35 \text{ m} - 10 \text{ m} = 25 \text{ m}$$

La posición del nivel dinámico después de 15 minutos se ilustra en la figura 4.7.

4.1.4 REVISION DEL EQUIPO DE EXTRACCIÓN

Debido a que no se puede determinar con exactitud cual es la vida útil del equipo de bombeo o de cada una de sus partes, no es posible recomendar un período de tiempo fijo para la reposición del equipo completo o de algunas de sus partes. Sin embargo si se establece un programa para pruebas completas del equipo de extracción y los resultados de estas pruebas se comparan con el funcionamiento del equipo en su condición inicial, cualquier anomalía en el funcionamiento de la bomba se detecta mediante esta prueba.

El correr una prueba completa es menos costoso que extraer la bomba para inspección, además no deja fuera de servicio al pozo.

En el mantenimiento preventivo del equipo de extracción, además de la citada prueba y comparación de resultados, existen ciertas evidencias que indican que el equipo de extracción tiene algún desperfecto, por ejemplo; un ruido o temperatura excesiva del equipo.

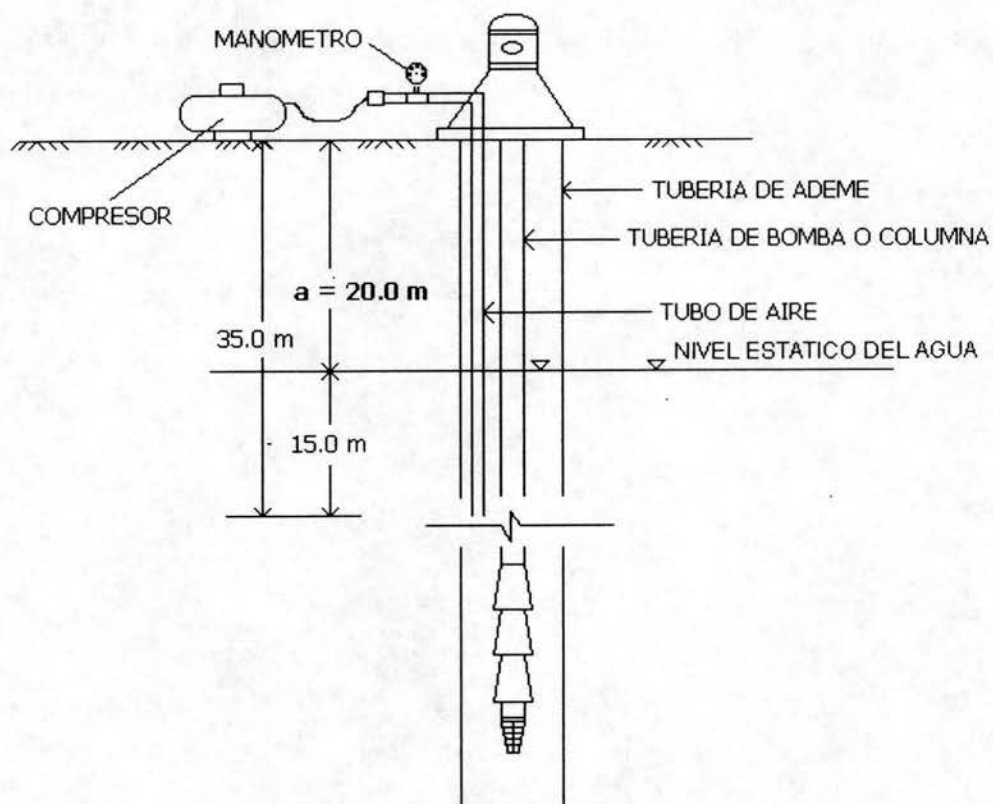


Figura 4.6 Determinación del nivel estático, utilizando el método de la línea de aire.

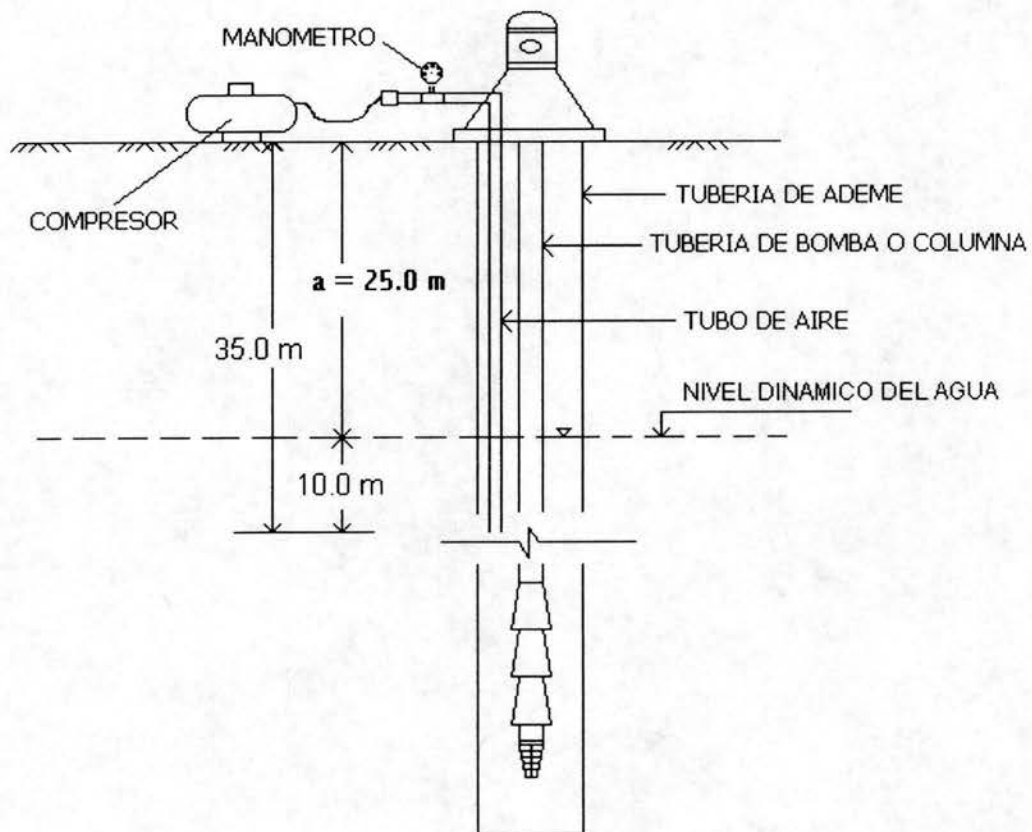


Figura 4.7 Determinación del nivel dinámico, utilizando el método de la línea de aire.

No se deben pasar por alto el más mínimo indicio de la posible declinación del funcionamiento del equipo de bombeo, ya que si se permite que estas anomalías continúen, se corre el riesgo de la destrucción del equipo, más allá de cualquier posibilidad de reparación.

No se debe olvidar, que se deben estudiar cuidadosamente los instructivos de los fabricantes del equipo de extracción antes de tratar de dar servicio a éste.

La figura 4.8 muestra una bomba para pozo profundo de flecha.

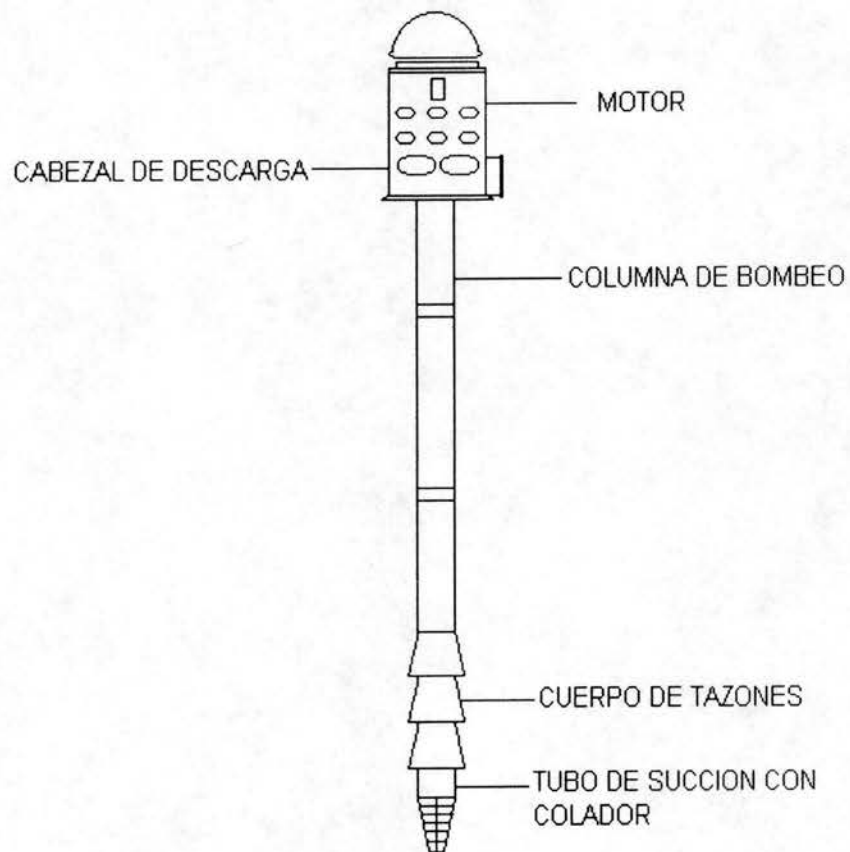


Figura 4.8 Bomba para pozo profundo de flecha.

4.2 MANTENIMIENTO CORRECTIVO

Cuando el pozo presenta una disminución en su productividad es necesario realizar un mantenimiento correctivo o rehabilitación.

El mantenimiento correctivo o rehabilitación de un pozo se define como el tratamiento mecánico, químico u otro medio que tenga como propósito el recuperar la pérdida de productividad del pozo, debido a las obstrucciones que impiden el paso del agua del acuífero al pozo en la zona productora del mismo, como por ejemplo: obstrucciones en las ranuras de cedazo o en el área adyacente al pozo, azolve, colapsos o roturas del ademe que impidan una buena operación del pozo.

La disminución de la productividad puede ser también ocasionada por el deterioro del equipo de bombeo, en este caso, éste debe ser reparado o reemplazado por equipo nuevo, de acuerdo al diagnóstico del taller. Otro factor que origina la disminución de la productividad de un acuífero es el agotamiento de éste, en tal caso se deberán realizar estudios geohidrológicos para determinar el régimen de explotación más conveniente que evite que el agotamiento del acuífero continúe.

De lo anteriormente expuesto se desprende que la disminución de la productividad puede tener una o varias causas: deterioro del equipo de bombeo, deterioro del pozo en sí, agotamiento del acuífero o también puede ser una combinación de estas tres causas. Para determinar cual es el origen de la disminución de la productividad es necesario realizar lo que se conoce como una prueba de diagnóstico. Esta prueba consiste básicamente en obtener la curva de aforo y la curva de funcionamiento de la bomba en las condiciones actuales en las que está operando el pozo y compararlas con las curvas originales (obtenidas al inicio de la operación del pozo), esta comparación permite saber cual es la causa de la disminución de la productividad.

4.2.1 DESINCRUSTACIONES

El fenómeno de la incrustación consiste en la obstrucción de la formación acuifera en la proximidad de la perforación del pozo y la oclusión o taponamiento de las aberturas de la rejilla. La incrustación es la causa más frecuente de la disminución del rendimiento de un pozo de extracción de agua.

La incrustación se produce por la deposición o acumulación de materiales extraños en las fisuras o poros de la formación acuifera, así como en las aberturas de la rejilla.

No se debe confundir a la incrustación con la corrosión, la incrustación, como ya se mencionó se manifiesta cuando ciertos minerales inconvenientes como el calcio y el magnesio se acumulan

dentro y cerca de las aberturas de la rejilla o en los vacíos de la formación acuífera, mientras que la corrosión es una acción química que afecta a los metales y que hace que éstos sean carcomidos por el agua. Sin embargo ambos, incrustación y corrosión, ocasionan efectos contrarios en el rendimiento de un pozo, además bajo ciertas condiciones podría manifestarse simultáneamente, ya que los productos derivados de la corrosión del hierro puede causar incrustaciones.

Son la clase y cantidad de minerales y gases disueltos en el agua los que determinan la tendencia de éstas a corroer los metales o a depositar parte de los minerales como incrustación. Las sustancias disueltas en el agua subterránea se encuentran en una condición de equilibrio bastante inestable. Al producirse un hecho que altere este equilibrio, algunas de estas sustancias dejan de estar en solución y se depositan como materia sólida, produciendo la incrustación.

Actualmente la corrosión se puede contrarrestar con el empleo de rejillas resistentes a este fenómeno. Desafortunadamente no se puede hacer lo mismo con la incrustación.

La incrustación se puede presentar de dos formas distintas; como una deposición dura y frágil, parecida a la costra que se forma en los conductos de agua, otra presentación es en forma de material gelatinoso suave y pastoso como el lodo.

En orden de la frecuencia con que se manifiestan, las diferentes formas de incrustación son las siguientes:

- a) Incrustación provocada por la precipitación de carbonatos de calcio y de magnesio o de los sulfatos de magnesio.
- b) Incrustación ocasionada por la precipitación de compuestos de hierro y manganeso, principalmente son hidróxidos y óxidos hidratados.
- c) Obstrucción debida a la gelatina producida por la bacteria ferrosa y otros organismos productores de material similar.
- d) Obstrucción producida por la deposición de materiales como limo y arcilla, llevados en suspensión hasta la rejilla. Esta obstrucción no es frecuente, se presenta si las aberturas de la rejilla son sumamente pequeñas o si el pozo no fue desarrollado adecuadamente.

Existen diferentes tratamientos para eliminar la incrustación (desincrustaciones), siendo la causa que la origina lo que orienta al tipo de tratamiento a utilizar. Entre los tratamientos de desincrustación se encuentran los siguientes:

Existen diferentes tratamientos para eliminar la incrustación (desincrustaciones), siendo la causa que la origina lo que orienta al tipo de tratamiento a utilizar. Entre los tratamientos de desincrustación se encuentran los siguientes:

1. Tratamiento con ácido clorhídrico (ácido muriático)
2. Tratamiento con ácido sulfámico
3. Tratamiento con cloro
4. Tratamiento con polifosfatos cristalinos
5. Uso de explosivos
6. "Sonar Jet"

1. El ácido clorhídrico disuelve fácilmente los carbonatos de calcio y de magnesio. Los hidróxidos de hierro y de manganeso y sus óxidos son también muy solubles en este ácido. La solubilidad de los materiales incrustantes facilita su desalojo del pozo.

2. El ácido sulfámico es un material granular, seco, que se transforma en un ácido líquido fuerte cuando se disuelve en agua. El transporte y manejo de ácido, en estado seco, es más seguro que el del ácido clorhídrico.

El contacto del ácido sulfámico con los carbonatos de calcio y de magnesio, produce sulfatos de calcio y de magnesio, los cuales son altamente solubles.

El inconveniente que presenta el ácido sulfámico es que su acción es más lenta que la del ácido muriático, por lo que se requiere un periodo de tratamiento mayor.

3. Tratamiento con cloro. En muchas ocasiones se ha observado que el taponamiento de las ranuras de los ademes y de los poros o fracturas de la formación acuífera es provocado por desarrollos orgánicos de la bacteria del fierro (bacterias *Crenotrix* y *Gallionella*), que utilizan al fierro en solución como una fuente de energía. Estas bacterias crecen y se desarrollan en el interior de los pozos formando costras gelatinosas o lamosas que provocan el taponamiento y disminución del rendimiento del pozo.

Las incrustaciones provocadas por desarrollos bacteriales y los depósitos viscosos acompañados por deposiciones de óxido de hierro, no pueden eliminarse fácilmente mediante el tratamiento con ácido, ya que éste mata la bacteria, pero no elimina la viscosidad.

Se ha encontrado que el tratamiento con cloro es más eficaz para eliminar este tipo de incrustación ya que además de matar la bacteria, elimina la viscosidad.

4. La acción de los polifosfatos sobre las incrustaciones, es como la de algunos detergentes domésticos, a diferencia de que las sustancias utilizadas en la limpieza de pozos no producen espuma.

A diferencia de los ácidos, los polifosfatos no disuelven la incrustación, si no que estos rompen los materiales incrustantes y los dispersa, para que posteriormente por medio de bombeo seas extraídos del pozo.

5. Los pozos que se encuentran en formaciones de roca consolidada y los cuales no tienen rejilla, también sufren los problemas de la incrustación. En estos casos las voladuras con nitroglicerina han demostrado ser más efectivas que los tratamientos químicos.

En los tratamientos para desincrustación con soluciones químicas es fundamental una agitación adecuada de estas sustancias dentro del pozo, para lograr que dichas soluciones penetren a través de la rejilla a la formación. Para la agitación de las sustancias químicas se utilizan los mismos métodos que para el desarrollo de pozos con pequeñas variantes, por ejemplo, se puede utilizar el pistoneo, aire comprimido o chorros de agua a alta velocidad.

Es recomendable alternar el tratamiento con ácido, con la aplicación de cloro, repitiendo la combinación hasta que se dejen de obtener resultados beneficiosos.

Si bien es cierto que el metal del que está hecho la rejilla rara vez influye en la manifestación de la incrustación. En la elección del metal de la rejilla debe tomarse en cuenta, que en acuíferos donde se presenta la incrustación, la rejilla debe resistir el tratamiento con ácido.

6. Método de "Sonar-Jet". Es un método moderno de desincrustación por medio de ultrasonido, consiste en sartas explosivas que se introducen al pozo y que se hacen detonar a la profundidad seleccionada, produciéndose ondas armónicas de impacto que provocan la desincrustación. Las sartas están especialmente diseñadas y estudiadas para producir la vibración requerida.

Experiencias tenidas en cientos de pozos donde se ha aplicado este método, han mostrado que se incrementa el caudal de operación de los mismos. En general se puede considerar que mediante la utilización del método "Sonar-Jet" se llega a recuperar entre un 50% y un 80% del caudal perdido.

4.2.2 RESCATE DEL EQUIPO ATRAPADO

En el mantenimiento correctivo o rehabilitación de pozos es muy común encontrar materiales extraños al pozo, como partes de bombas o bombas completas, así "como herramientas de pesca" o pedazos de éstas, las cuales disminuyen la productividad del pozo y en algunos casos llega a impedir la operación del mismo.

Al rescate y extracción de este equipo se le denomina "pesca". Las operaciones para pesca son muy variables, ya que dependen de las características del equipo a rescatar.

A continuación se mencionan algunas de las herramientas más comunes para pesca.

1. Arpón de cable. Se utiliza para recuperar el cable de acero o cable de las bombas sumergibles. El arpón puede ser sencillo o doble como se muestra en la figura 4.9. La operación de pesca consiste en bajar el arpón de cable al interior del pozo, el cual va unido a las tijeras de pesca y éstas a su vez están conectadas con una barra corta para dar peso y permitir que el arpón baje lo suficiente para atrapar el cable.

2. Mano de diablo. Esta herramienta de pesca se emplea para recuperar objetos pequeños que se encuentran dentro del pozo., la cual está construida con unas barras delgadas de acero resistente que asemejan unos dedos, que van montados en un cuerpo hueco. Los "dedos" se cierran sobre el objeto por recuperar, de tal manera que éste queda atrapado entre sus "dedos" al izar la herramienta de pesca. La figura 4.10 presenta esta herramienta.

3. Arpón de tubería. Esta herramienta se utiliza para rescatar bombas, se emplea con las tijeras de pesca y cuando entra dentro de la columna de la bomba las cuñas se levantan permitiendo el paso de las mismas y cuando el arpón es levantado, las cuñas se deslizan y aprietan a la columna, lo que permite extraerla del pozo. En la figura 4.11 se muestra esta herramienta de "pesca"

En la pesca para bombas es muy común recurrir a herramientas de pesca de "fabricación casera", con dispositivos que el ingenio, de quien realiza la rehabilitación, encuentre adecuados en cada caso particular.



Figura 4.9 a) Arpón sencillo, b) Arpón doble.



Figura 4.10 Herramienta para "pesca "llamada "mano de diablo".

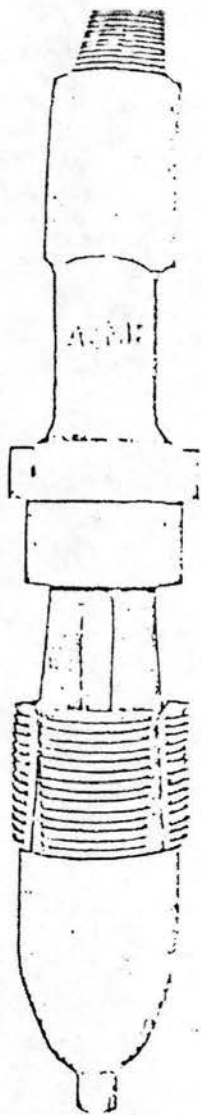


Figura 4.11 Arpón de tubería.

4.2.3 DESAZOLVE

Otro problema que frecuentemente se llega a presentar en los pozos para extracción de agua es el azolve. Cuando un pozo tiene un cierto tiempo de estar trabajando, es común que se llegue a presentar azolve en el fondo.

La cantidad y tipo de azolve que se acumule depende del tipo de material que constituye la formación acuífera, así como el diseño del pozo. En terrenos con materiales sueltos donde el ademe presenta ranuras de gran abertura, el pozo será más susceptible a la acumulación de azolves. En algunos casos, roturas en el ademe pueden ocasionar la entrada de grava del filtro y material de la formación hacia el interior del mismo, provocando la acumulación de azolve de gran parte del pozo.

El desazolve se efectúa generalmente con máquinas pequeñas de percusión debido a que con el empleo de éstas se reducen los costos. El desazolve se realiza generalmente removiendo el fondo con una barrena pequeña y extrayéndolo con una cuchara de perforación.

El desazolve también puede hacerse con equipo de perforación rotatorio, pero en éste se tiene que recurrir a lodo bentónico para ayudar a levantar los materiales de azolve, pudiendo provocar el sellar la zona productiva. En general, cuando se emplea mucha bentonita o el tiempo de desazolve se prolonga por problemas propios de la rehabilitación, este método no es muy recomendable.

Otro método que se utiliza para realizar el desazolve es el bombeo neumático, el cual fue descrito en el capítulo 3 como un método de desarrollo. En esencia el equipo que se utiliza para desazolve es el mismo que para el desarrollo.

4.2.4 ENCAMISADOS

En los últimos años y principalmente debido a la innovación de la cámara de televisión para la inspección de pozos, se ha podido observar que es frecuente encontrar colapsos en los ademes, (zonas donde la tubería se encuentra rota), con salientes hacia el centro del pozo, que impiden el libre paso del equipo de bombeo; se encuentran también "panzas" dentro del ademe que deforman y disminuyen el diámetro interior; así como tuberías de ademe desunidas, separadas considerablemente, a través de las cuales se introducen gravas y materiales de la formación acuífera al pozo.

El encamisado es utilizado para la solución de algunos de estos problemas. Consiste en la introducción y colocación de tubería de menor diámetro en el ademe del pozo.

Existen prensas hidráulicas que son introducidas al pozo y colocadas en el sitio donde existe la desviación o colapso. La prensa hidráulica rectifica el diámetro del pozo y, si es necesario, se introduce una camisa la cual es "planchada" contra las paredes del pozo, utilizando para ello la prensa hidráulica.

El encamisado también se utiliza para eliminar oquedades en la tubería, desgarramientos, etc., se introduce un ademe de menor diámetro y se coloca un filtro de grava en el espacio anular entre las dos tuberías. El inconveniente de esta operación, es la disminución del diámetro disponible para la introducción del equipo de bombeo.

CAPITULO 5. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN POZO PROFUNDO LOCALIZADO EN EL MUNICIPIO DE ECATEPEC, ESTADO DE MÉXICO

En este capítulo se describe el diseño y construcción del pozo profundo No. 308, denominado: Isla del Socorro, Sección Islas Jardines de Morelos, ubicado en: Carretera México-Texcoco s/n (Predio de Central de Abastos), en Ecatepec de Morelos, Estado de México. En la figura 5.1 se indica la localización del pozo en cuestión.

El municipio de Ecatepec de Morelos se ubica en la región hidrológica numero 26 o del "Alto Panuco", que por sus dimensiones se encuentra dividida en varias subcuencas. Las subcuencas correspondientes a Ecatepec son la "D" o del río Moctezuma y la "P" que corresponde a la de los lagos de Texcoco y Xaltocan.

Ecatepec de Morelos tiene una superficie de 155,492 km² y está integrado en la región económica II, con sede en Zumpango. Se ubica al noreste del valle de México y al oriente del Estado de México.

El municipio de Ecatepec de Morelos a través del Organismo Público Descentralizado denominado S.A.P.A.S.E. (Servicio de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento de Ecatepec) contrató a la empresa Constructora MARVIDE S.A. de C.V. para realizar "La Perforación del Pozo No. 308, Isla del Socorro Sección Islas Jardines de Morelos". La orden de trabajo se formalizó mediante el contrato No. SAPAP -05/97 con un importe de \$1,565,621.59 (un millón quinientos sesenta y cinco mil seiscientos veintiún pesos 59/100 M.N) sin incluir el IVA. El plazo de ejecución de la obra fue del 21 de julio de 1997 al 13 de octubre de 1997.

La obra beneficiaría aproximadamente a 40,000 habitantes de colonias aledañas, a las que se les venía suministrando agua por medio de camiones-pipa, así como a colonias en las que se tiene déficit en el suministro del vital líquido, dentro de las colonias beneficiadas se encuentran: ampliación playa San Juan. Mexicanos Unidos, los Pinos y unidad Habitacional Fovissste.

La empresa, Constructora MARVIDE S.A. de C.V, previamente al inicio de los trabajos de perforación, llevó a cabo el estudio geofísico por resistividad eléctrica en las instalaciones de la central de abasto de Ecatepec de Morelos, en el Estado de México, con la finalidad de conocer la estructura geohidrológica del subsuelo y poderla correlacionar, mediante la interpretación geológica y geoeléctrica con horizontes o paquetes de roca capaces de almacenar agua subterránea y susceptible de ser explotada por medio de la perforación de uno o más pozos profundos eligiendo el sitio o sitios más adecuados.

Mediante este estudio geofísico se obtuvo el perfil de resultados que se presenta en la figura 5.2. En dicho perfil se puede observar que la estructura geohidrológica está conformada por varios paquetes de rocas. A continuación se hace una breve descripción de éstos haciendo una correlación desde el punto de vista geológico.

Horizonte A.- Es una capa cuyo espesor es de 25 a 30 m. Geológicamente se correlaciona con una alternancia de arcillas, limos, arenas finas y mezcla entre ellos. Se le considera una permeabilidad de grado bajo por lo que es de bajo interés acuífero.

Horizonte B.- Tiene un espesor mínimo de 100 m. hacia la porción superior del sondeo e indeterminado a partir de los 160 m. (aproximadamente) de profundidad. Geológicamente se correlaciona con materiales de naturaleza volcánica, tales como derrames lávicos (de basalto, principalmente), aglomerados y brechas, estimándosele un grado medio alto de fracturamiento. Se le considera un grado de permeabilidad medio alto, constituyendo el horizonte con mejores posibilidades acuíferas.

Horizonte C.- Esta capa se encuentra interdigitada en el horizonte B, con un espesor aproximado de 30 m. Geológicamente se correlaciona con rocas de un alto contenido de material arcilloso y/o con rocas muy fracturadas. Si corresponde a rocas muy fracturadas tendrán interés acuífero y en el caso de materiales arcillosos, carecen totalmente de interés.

De la correlación de la información obtenida mediante el estudio geofísico mencionado, así como de pozos cercanos, la estratigrafía local y considerando el aspecto geológico y geofísico de los diferentes estratos detectados en el subsuelo, se puede concluir que la zona de estudio, presenta condiciones favorables para el alumbramiento del agua subterránea, ya que las rocas ahí presentes, en su mayoría se les considera de grado medio a alto de permeabilidad, aun cuando puede haber algunos horizontes impermeables.

Tomando como base esta columna litológica se realiza el diseño del pozo, el cual podrá variar dependiendo de las muestras de roca obtenidas durante la perforación y los datos obtenidos mediante el registro eléctrico el cual se tomará al concluir la perforación.

Por lo tanto se recomienda realizar una perforación exploratoria con las siguientes características:

Profundidad: Llevar a cabo una perforación en el sitio donde se ubicó el sondeo, hasta una profundidad de proyecto (p.p.) de 250 m.

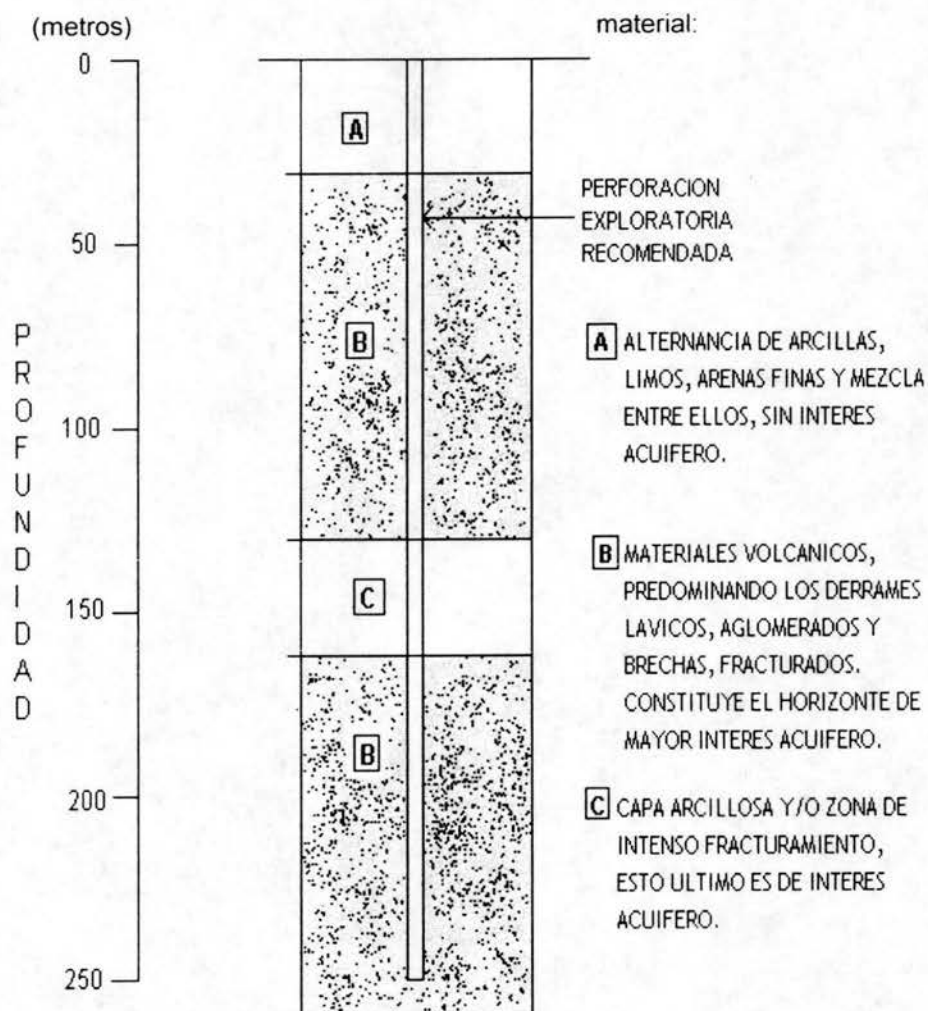


Figura 5.2 Perfil obtenido mediante estudio geofísico realizado en la zona de la central de abastos de Ecatepec de Morelos, estado de México.

Diámetro: Debido a que esta perforación será inicialmente de carácter exploratorio, el diámetro será de 12¼ " .

Mediante la perforación exploratoria se determinará con certeza la columna litológica atravesada, con base en las muestras obtenidas y en la bitácora de campo, se interpretará el registro eléctrico; así mismo se realizará el análisis granulométrico que definirá el diseño de terminación del aprovechamiento, para lo cual deberán colectarse aproximadamente a cada 2 m. de profundidad 1 Kg de muestra, mismas que serán enviadas al laboratorio para elaborar el diseño del pozo definitivo.

Una vez que se haya concluido la perforación exploratoria y si los resultados son satisfactorios, es decir, que el pozo tenga buenas posibilidades de aportar agua en cantidades suficientes para satisfacer las necesidades requeridas, se procede con la segunda etapa que es el diseño y terminación definitiva del pozo, que consiste en programar adecuadamente los tramos de tubería a instalar, así como el filtro de grava a utilizar, previa ampliación de la perforación para la colocación del ademe programado.

DISEÑO DEFINITIVO

PROFUNDIDAD DEL POZO

De acuerdo a la correlación de los distintos estudios (información sobre la estratigrafía local, pozos cercanos, estudio geofísico, estudios granulométricos y registro eléctrico tomado al final de la perforación exploratoria) se obtuvo el corte litológico para el diseño definitivo del pozo, dicho corte se muestra en la figura 5.3. Basados en los distintos estudios se decide realizar la perforación hasta los 250 m de profundidad, a pesar de que el acuífero tiene una profundidad mayor.

DIÁMETRO DEL ADEME LISO

De acuerdo a los pozos existentes en la zona el gasto que se pretende obtener se encuentra en el orden de los 80 l/seg. Por lo que de acuerdo a lo recomendado por Johnson y el American Petroleum Institute, para extraer un caudal de 80 l/seg se requiere una bomba de 12" de diámetro, como la que se muestra en la figura 5.4, por lo que la cámara de bombeo o ademe liso será de 16" (406.4mm) de diámetro (tabla 2.1). A continuación se verifica si con este diámetro de 16" la velocidad es menor a 1.5. m./seg. para evitar pérdidas excesivas de carga hidráulica.

$$Q=AV$$

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

$$Q=80 \text{ lts/seg}=0.080 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$D = 406 \text{ mm} = 0.406\text{m}$$

$$A = \frac{\pi(0.406)^2}{4} = 0.13\text{m}^2$$

$$V = \frac{0.080\text{m}^3 / \text{seg}}{0.13\text{m}^2}$$

$$V = 0.62\text{m/seg}$$

$$0.62\text{m/seg} < 1.5\text{m/seg}$$

Por lo tanto se acepta el diámetro de 16".

En caso de que la velocidad "V" resultara mayor de 1.5 m/seg, se propone un diámetro mayor y se verifica la condición $V < 1.5 \text{ m/seg}$ hasta que se satisfaga.

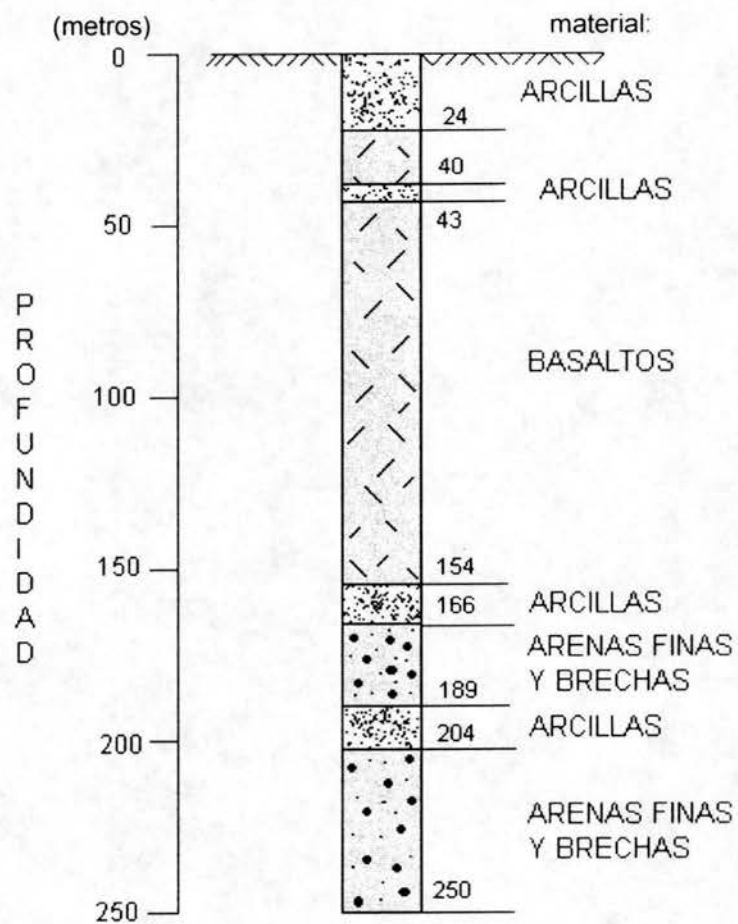


Figura 5.3 Corte litológico obtenido mediante la correlación de diversos estudios.



Figura 5.4 Bomba centrífuga vertical para pozo profundo.

LONGITUD DEL ADEME LISO

El reconocimiento geohidrológico de la zona indica que el nivel estático del agua se encuentra a una profundidad con respecto al nivel del terreno natural en el orden de los 15 m. y el nivel dinámico de bombeo a los 47 m. Por lo que el abatimiento esperado del nivel del agua es de:

$$47 \text{ m} - 15 \text{ m} = 32 \text{ m}$$

De los datos recabados en pozos de la zona se espera un abatimiento regional del nivel del agua de 0.5 m por año (el término abatimiento regional se refiere al abatimiento anual esperado por efecto de sobreexplotación regional del acuífero), se considera una vida útil del pozo de 15 años, por lo que el abatimiento regional es del orden de 7.5 m. Se considera además una sumergencia de la bomba de 15 m.

La longitud del ademe liso en la cámara de bombeo (C.B.) se muestra en la siguiente tabla:

Concepto	Longitud
Nivel estático (Z_{NE})	15.0 m
Abatimiento esperado (S)	32.0 m
Abatimiento regional (S_R)	7.5 m
Sumergencia de la bomba (Z_{SB})	15.0 m
Longitud total	69.5 m

Por lo tanto el ademe liso en la cámara de bombeo se extenderá hasta los 70.0 m de profundidad. La figura 5.5 esquematiza los niveles del agua dentro del pozo en la cámara de bombeo.

El ademe liso consiste en tubería metálica de acero al carbón de 16" de diámetro por $\frac{1}{4}$ " de espesor con una sobre elevación de 0.50 m por encima del terreno natural.

DISEÑO DEL FILTRO DE GRAVA

Análisis granulométrico

Tomando como base la correlación de los resultados obtenidos mediante el estudio geofísico, los estudios geohidrológicos de la zona y el registro eléctrico, se seleccionaron y analizaron 5

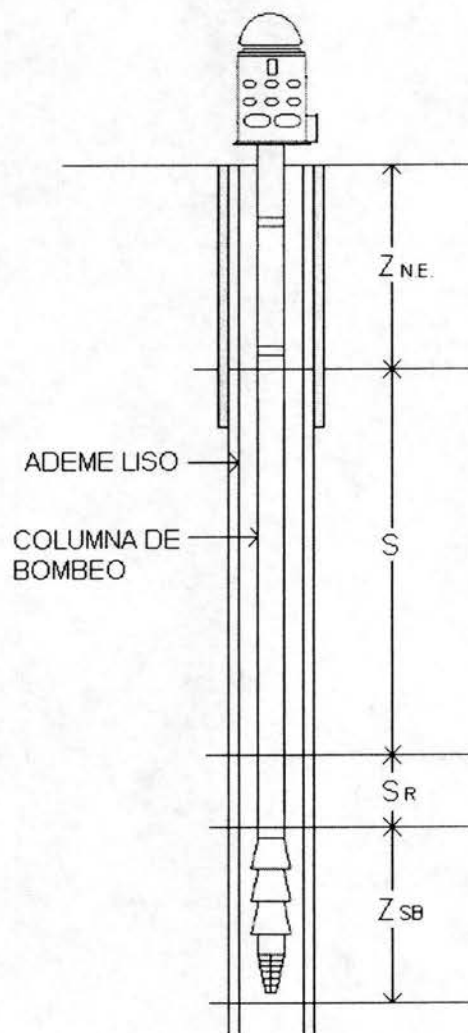


Figura 5.5 Esquema de niveles del agua dentro del pozo en la cámara de bombeo.

muestras del material atravesado. De éstas se eligió la que representa el material más fino, cuya gráfica se ilustra en la figura 5.6.

Con la gráfica granulométrica de la figura 5.6 se procedió al diseño del filtro de grava, utilizando el **método de Johnson**, el cual se describe a continuación:

1. En la gráfica de la figura 5.6 se obtiene que el:

$$d_{30} = 1.0 \text{ mm}$$

De la observación de la curva granulométrica, se concluye que el material es grueso y no uniforme y no contiene limo, por lo que el valor $d_{30} = 1.0 \text{ mm}$, se multiplica por un factor igual a 6 :

$$d_{30\text{filtro}} = d_{30\text{acuifero}} \times 6 = 1.0 \text{ mm} \times 6 = 6.0 \text{ mm}$$

2. Con este valor de $d_{30} = 6$, se pivotea, obteniendo un coeficiente de uniformidad no mayor de 2.5, que en este caso se eligió el valor de 2.4, obteniendo como valores $d_{60} = 10.0 \text{ mm}$ y $d_{10} = 4.1 \text{ mm}$. Con los tres puntos d_{10} , d_{30} y d_{60} , se trazó la curva del filtro, que tiene una forma de "S" invertida. La gráfica granulométrica del filtro se muestra en la figura 5.7.

3. En base a la curva granulométrica de la figura 5.7 se eligió la siguiente serie de cribas, y se obtuvo su porcentaje retenido con la tolerancia de $\pm 8 \%$. Esto significa que se grafican dos líneas a los lados de la curva granulométrica con el rango porcentual mencionado, que serán las franjas de seguridad.

Cualquier filtro que tenga una curva granulométrica que se encuentre entre las franjas de seguridad será aceptado como bueno.

Abertura de la malla	% retenido
3/4"	0-8
1/2"	12-28
1/4"	58-74
No.6	76-100

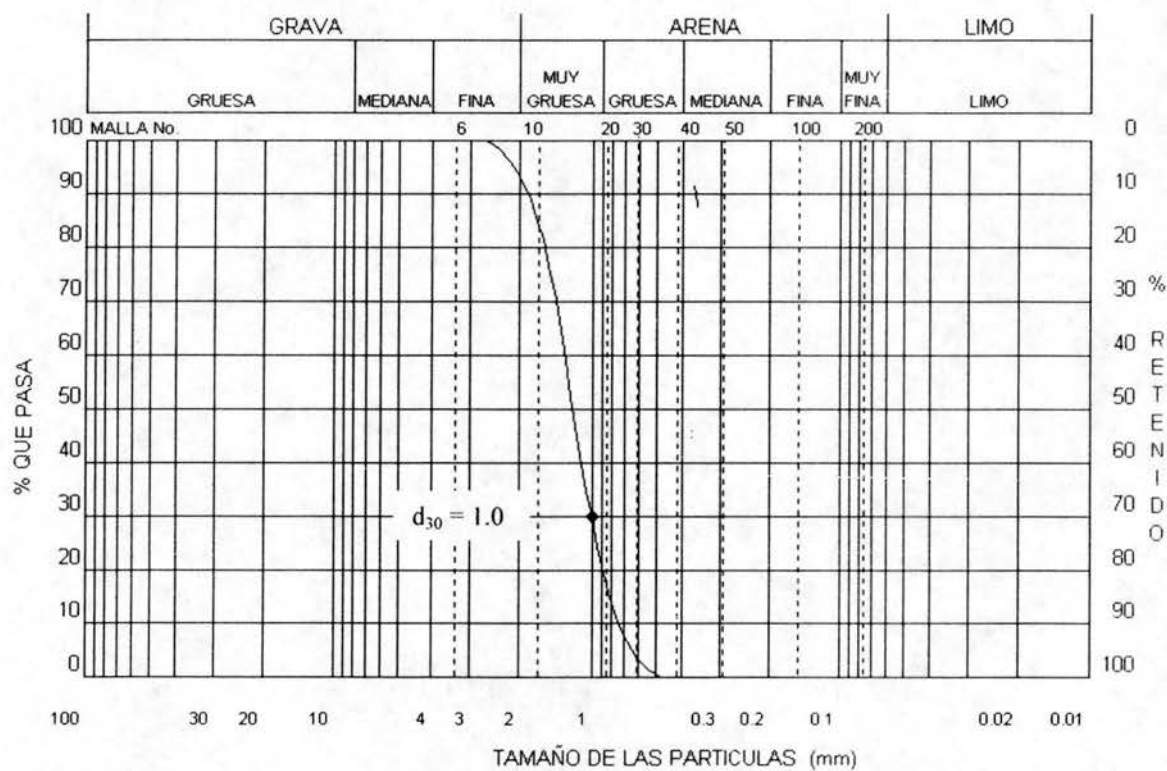
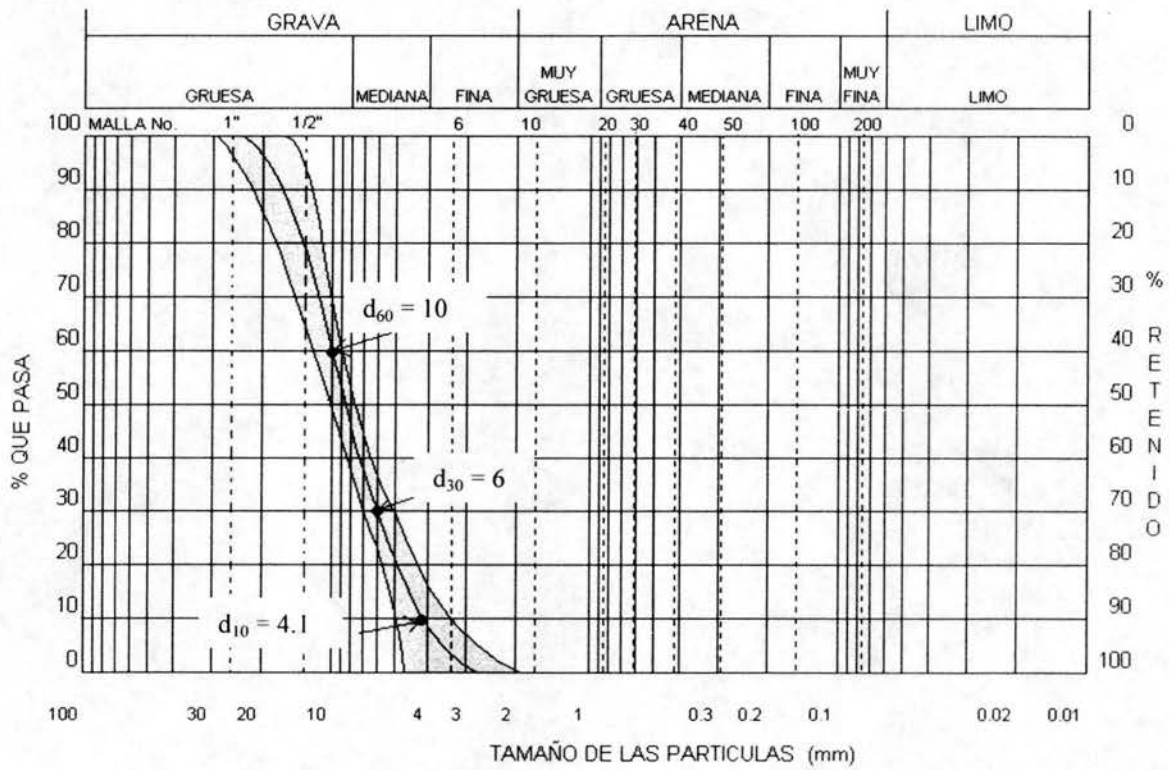


Figura 5.6 Gráfica granulométrica del material más fino, el cual fue seleccionado para el diseño del filtro de grava.



$$Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

$$d_{60} = 10$$

$$d_{10} = 4.1$$

$$Cu = \frac{10}{4.10} = 2.4$$

Figura 5.7 Gráfica granulométrica del filtro de grava.

ELECCIÓN DE LA ABERTURA DE LAS RANURAS DEL CEDAZO

Como se menciona en el capítulo 2.3.6. la abertura de la rejilla debe retener el 90% del filtro de grava.

En la figura 5.5 se observa que el tamaño que retiene el 90% (d_{10}) corresponde a 4.1 mm., por lo que se tomará el tamaño comercial inferior que corresponde al tipo II cuyo ancho de ranura es de 3.96 mm (5/32") como se observa en la tabla 5.1.

CARACTERISTICAS TECNICAS DE LA RANURACION TUBACERO S.A.

AREAS DE INFILTRACION (CM²/ML)

DIAMETRO		ANCHO DE RANURA (MM)								
		RANURA TIPO II			RANURA TIPO III			RANURA TIPO IV		
PULG.	MM	3.96	4.78	6.35	3.96	4.78	6.35	3.96	4.78	6.35
6 5/8	168					155	206			
8 5/8	219	166	200	265	207	250	332	331	400	531
10 3/4	273	194	233	310	249	300	398	415	499	664
12 3/4	324	228	275	365	290	350	465	477	574	763
14	356	270	325	431	353	425	564	560	674	896
16	406	290	350	465	394	475	630	643	774	1029
18	457	311	375	498	436	524	697	726	874	1161
20	508	353	425	564	498	599	796	809	974	1294

Tabla 5.1 Áreas de infiltración por metro lineal de ademe ranurado

LONGITUD DEL ADEME RANURADO

Como la profundidad del pozo se extiende hasta los 250 m y debido a que se colocarán dos tramos intermedios de ademe liso debido a que se encuentran dos estratos impermeables de arcilla después del estrato de basaltos (figura 5.3), la distribución y longitud del ademe ranurado será la siguiente:

Ubicación	Longitud
De 70-154 m	84
De 166-189 m	23
De 204-249 m	45
Total de ademe ranurado	152 m

DIÁMETRO DEL ADEME RANURADO

Primeramente se propone utilizar el mismo diámetro que la tubería lisa, es decir 16", para este diámetro, de acuerdo a la tabla 5.1 se tiene un área de infiltración de 290 cm²/m.

Longitud del ademe ranurado = 152 m

$$\text{Área total de infiltración} = 290 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} \times 152 \text{m} = 44,080 \text{cm}^2$$

$$Q = 80 \text{ lts seg} = 80,000 \text{ cm}^3 \text{ seg}$$

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

$$V = \frac{80,000 \text{ cm}^3 \text{ seg}}{44,080 \text{ cm}^2} = 1.81 \text{ cm/seg}$$

Aunque la velocidad es menor a 3 cm/seg, se disminuirá el diámetro de la tubería ranurada para aproximarse al límite permitido. Se probará con diámetro de 8⁵/₈" , esta tubería tiene una área de infiltración de 166 cm² m

$$\text{Área total de infiltración} = 166 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} \times 152 \text{m} = 24,900 \text{cm}^2$$

$$V = \frac{80,000 \text{ cm}^3 \text{ seg}}{24,900 \text{ cm}^2} = 3.17 \text{ cm/seg}$$

Esta velocidad supera el límite de los 3 cm/seg, por lo que se analizará un diámetro superior. La tubería de 10³/₄" tiene una área de infiltración de 194 cm² m

$$\text{Área total de infiltración} = 194 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} \times 152 \text{m} = 29,488 \text{cm}^2$$

$$V = \frac{80,000 \text{ cm}^3 \text{ seg}}{29,488 \text{ cm}^2} = 2.71 \text{ cm/seg}$$

Se acepta el diámetro de 10³/₄" , con un ancho de abertura de 3.96 mm (5/32", obtenido anteriormente)

CONTRA ADEME

Debido a que alrededor del aprovechamiento del agua subterránea se encuentran asentamientos humanos, se colocará un contra ademe de 26" de diámetro con tubo de acero de ¼" de espesor y hasta una profundidad de 40 m donde se localiza una zona impermeable de arcillas (ver figura 5.3).

Cumpliendo con estas condiciones se obtendrán las siguientes ventajas: se aislará el estrato superficial de arcilla (0-24 m) y parte del estrato basáltico (24-40 m), ver figura 5.3, que pudiera cambiar las características de calidad del agua al acuífero en explotación, así como la posible introducción de líquidos contaminantes provenientes de la zona o de desechos vertidos al sistema de drenaje.

DIÁMETRO DE LA PERFORACION

Los diferentes diámetros de las perforaciones son los siguientes:

Profundidad	Diámetro
De 0 a 40 m	30"
De 40 a 77 m	24"
De 77 a 250 m	18"

Para la obtención del diámetro de la perforación se consideró un espesor del filtro de grava de 4" y una zona cementada de 4" de espesor.

TAPON DE FONDO

El tapón de fondo, será de concreto de 1 m. de espesor, colocado a partir de los 249 m. hasta los 250 m. de profundidad.

PROTECCIÓN SANITARIA

El diseño de la protección sanitaria, tiene como finalidad el impedir posibles filtraciones de contaminantes superficiales al interior del pozo, para lo cual se recomiendan las siguientes especificaciones basadas en la Norma Oficial Mexicana NOM-003-CNA-1996 referente a los requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos:

- a) Tubería de ademe del pozo debe sobrepasar 50 cm. el nivel de la superficie del terreno.
- b) La tubería instalada como contra ademe debe sobresalir 0.50 m. del nivel del terreno, del nivel base del registro o de la protección sanitaria del pozo.

c) Se implantará sobre la superficie del terreno una placa de concreto de por lo menos 10 cm. de espesor, con ligera inclinación hacia sus bordes para drenar las posibles fugas, y que cubrirá el registro o protección sanitaria del pozo.

d) Implantará un sello de concreto o brocal en la parte superior para evitar en lo posible, la entrada de contaminantes al interior del pozo.

Las especificaciones anteriores se ilustran en la figura 5.8.

La figura 5.9 muestra el diseño del pozo numero 308.

A continuación se presenta el presupuesto del la perforación del pozo 308.

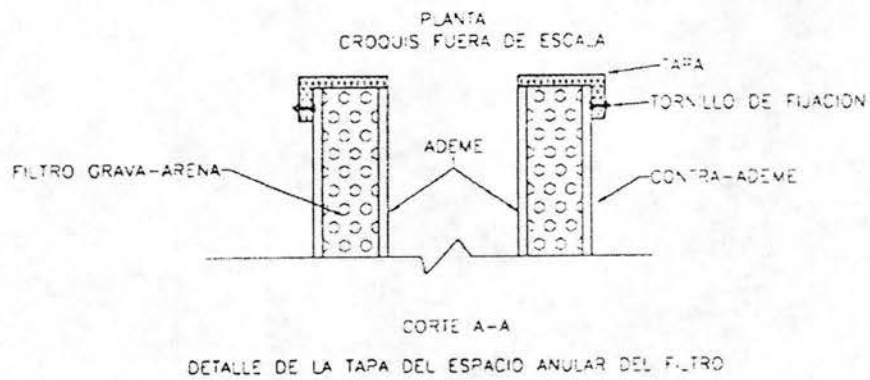
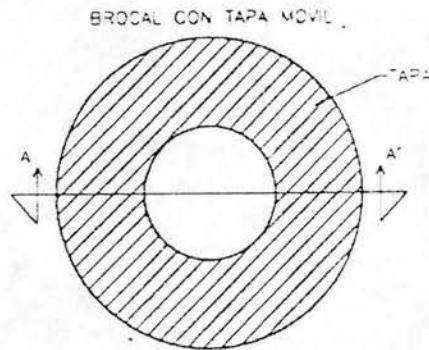
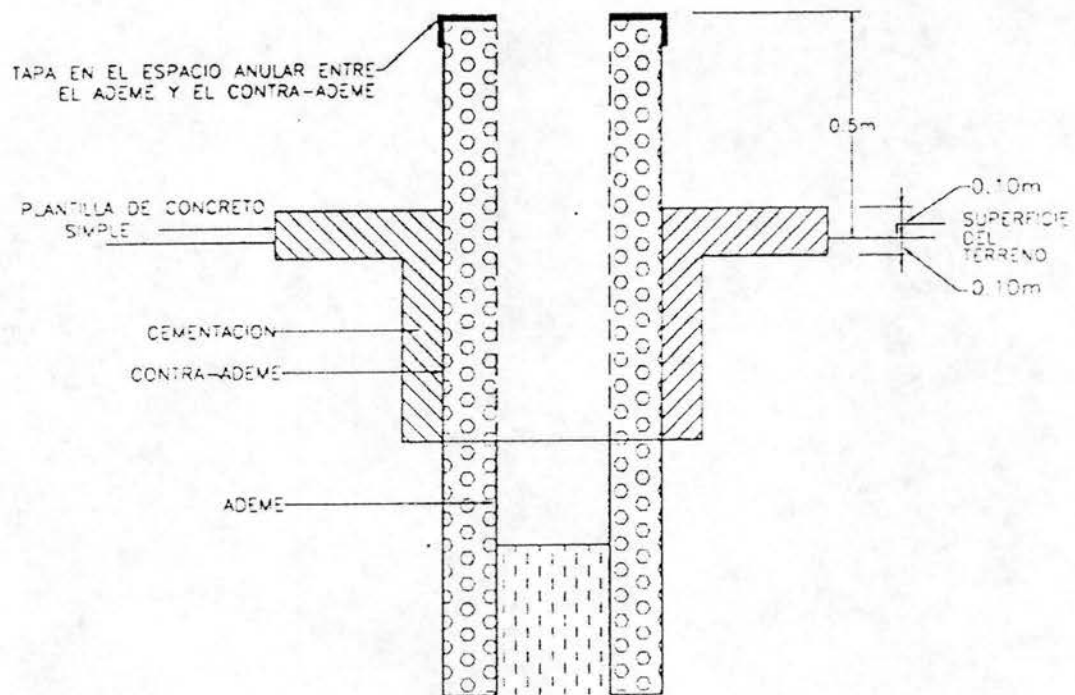


Figura 5.8 Protección sanitaria en la superficie de los pozos profundos.

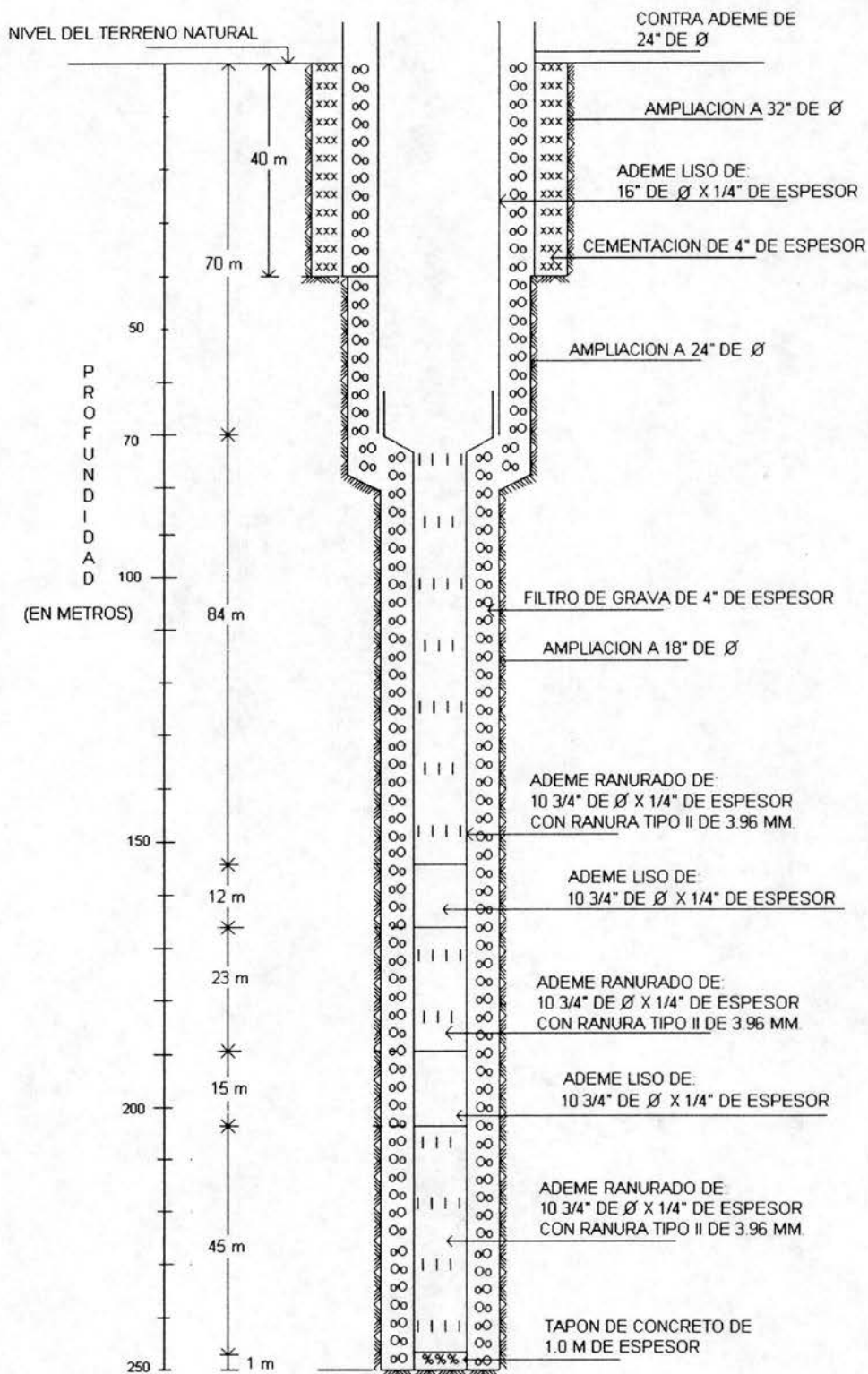


Figura 5. 9 Proyecto para el pozo No. 308 Isla del Socorro. Sección Islas jardines de Morelos.

NOMBRE DE LA ENTIDAD O DEPENDENCIA: S.A.P.A.S.E. (SERVICIO DE AGUA POTABLE ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO DE ECATEPEC)

NOMBRE DE LA OBRA: PERFORACIÓN DEL POZO NO 308, ISLA DEL SOCORRO, SECCIÓN ISLAS JARDINES DE MORELOS.

PRESUPUESTO

CLAVE	CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE	%
	MOVIMIENTO DE EQUIPO PESADO DE PERFORACIÓN COMPLETO CON HERRAMIENTAS Y ACCESORIOS, HASTA UNA DISTANCIA DE 15 KM.	LOTE	1.00	\$6,072.07	\$6,072.07	0.39
	INSTALACIÓN Y DESMANTELAMIENTO DE EQUIPO DE PERFORACIÓN.	LOTE	1.00	\$21,169.21	\$21,169.21	1.35
	TRANSPORTE DE EQUIPO PASADO DE PERFORACIÓN COMPLETO CON HERRAMIENTAS Y ACCESORIOS A KMS. SUBSECUENTES A LOS PRIMEROS 15 KM. EN CAMINO PAVIMENTADO.	LOTE/KM	16.00	\$620.79	\$9,932.64	0.63
	TRANSPORTE DE EQUIPO PASADO DE PERFORACIÓN COMPLETO CON HERRAMIENTAS Y ACCESORIOS A KMS. SUBSECUENTES A LOS PRIMEROS 15 KM. EN CAMINO LOMERÍO SUAVE.	LOTE/KM	2.00	\$505.81	\$1,011.62	0.06
	COSTO HORARIO EN EQUIPO DE PERFORACIÓN ROTATORIO DE 260 H.P., TRABAJANDO EN OPERACIONES ORDENADAS POR S.A.P.A.S.E. EXCEPTO PERFORACIÓN.	HORA	30.00	\$865.19	\$25,955.70	1.66
	EQUIPO DE PERFORACIÓN ROTATORIO INACTIVO EN ESPERA DE LAS ORDENES DE S.A.P.A.S.E. O DURANTE EL FRAGUADO DE LA CEMENTACIÓN DE 350 H.P.	HORA	60.00	\$832.10	\$49,926.00	3.19
	PERFORACIÓN DE POZO.					
	PERFORACIÓN DE POZO DE 31.2 CM. (12 1/4") DIÁMETRO NOMINAL EN MATERIAL CLASE 1.					
	PERFORACIÓN DE 0.0 A 100.0 M DE PROFUNDIDAD.	ML.	80.00	\$920.40	\$73,632.00	4.70
	PERFORACIÓN DE 100.0 A 200.0 M DE PROFUNDIDAD.	ML.	70.00	\$1,145.21	\$80,164.70	5.12
	PERFORACIÓN DE 200.0 A 300.0 M DE PROFUNDIDAD.	ML.	30.00	\$1,234.56	\$37,036.80	2.37
	PERFORACIÓN DE POZO DE 31.2 CM. (12 1/4") DIÁMETRO NOMINAL EN MATERIAL CLASE 2.					
	PERFORACIÓN DE 0.0 A 100.0 M DE PROFUNDIDAD.	ML.	10.00	\$1,012.44	\$10,124.40	0.65
	PERFORACIÓN DE 100.0 A 200.0 M DE PROFUNDIDAD.	ML.	20.00	\$1,259.73	\$25,194.60	1.61
	PERFORACIÓN DE 200.0 A 300.0 M DE PROFUNDIDAD.	ML.	10.00	\$1,358.01	\$13,580.10	0.87
	PERFORACIÓN DE POZO DE 31.2 CM. (12 1/4") DIÁMETRO NOMINAL EN MATERIAL CLASE 3.					
	PERFORACIÓN DE 0.0 A 100.0 M DE PROFUNDIDAD.	ML.	10.00	\$1,380.60	\$13,806.00	0.88
	PERFORACIÓN DE 100.0 A 200.0 M DE PROFUNDIDAD.	ML.	10.00	\$1,717.81	\$17,178.10	1.10
	PERFORACIÓN DE 200.0 A 300.0 M DE PROFUNDIDAD.	ML.	10.00	\$1,851.84	\$18,518.40	1.18
	AMPLIACIÓN DE DIÁMETRO.					
	AMPLIACIÓN DEL DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN DE 31.2 CM. A 45.7 CM. (12 1/4" A 18") DIÁMETRO NOMINAL EN MATERIAL CLASE 1.					
	AMPLIACIÓN DE 0.0 A 100.0 M. DE PROFUNDIDAD.	ML.	80.00	\$1,045.12	\$83,609.60	5.34
	SUBTOTAL ACUMULADO				\$486,911.94	31.10
					\$486,911.94	31.10

CLAVE	CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE	%
	AMPLIACIÓN DE 100.0 A 200.0 M. DE PROFUNDIDAD	ML.	70.00	\$1,265.87	\$88,610.90	5.66
	AMPLIACIÓN DE 200.0 A 300.0 M. DE PROFUNDIDAD.	ML.	30.00	\$1,548.60	\$46,458.00	2.97
	AMPLIACIÓN DEL DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN DE 31.2 CM. A 45.7 CM. (12 1/4" A 18") DIÁMETRO NOMINAL EN MATERIAL CLASE 2.					
	AMPLIACIÓN DE 0.0 A 100.0 M. DE PROFUNDIDAD	ML.	10.00	\$1,149.63	\$11,496.30	0.73
	AMPLIACIÓN DE 100.0 A 200.0 M. DE PROFUNDIDAD	ML.	20.00	\$1,392.46	\$27,849.20	1.78
	AMPLIACIÓN DE 200.0 A 300.0 M. DE PROFUNDIDAD.	ML.	10.00	\$1,703.46	\$17,034.60	1.09
	AMPLIACIÓN DEL DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN DE 31.2 CM. A 45.7 CM. (12 1/4" A 18 ") DIÁMETRO NOMINAL EN MATERIAL CLASE 3.					
	AMPLIACIÓN DE 0.0 A 100.0 M. DE PROFUNDIDAD.	ML.	10.00	\$1,567.68	\$15,676.80	1.00
	AMPLIACIÓN DE 100.0 A 200.0 M. DE PROFUNDIDAD	ML.	10.00	\$1,898.80	\$18,988.00	1.21
	AMPLIACIÓN DE 200.0 A 300.0 M. DE PROFUNDIDAD.	ML.	10.00	\$2,322.90	\$23,229.00	1.48
	AMPLIACIÓN DEL DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN DE 45.7 CM. A 60.96 CM. (18" A 24 ") DIÁMETRO NOMINAL EN MATERIAL CLASE 1.					
	AMPLIACIÓN DE 0.0 A 100.0 M. DE PROFUNDIDAD	ML.	70.00	\$1,180.78	\$82,654.60	5.28
	AMPLIACIÓN DEL DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN DE 60.96 CM. A 81.28 CM. (24" A 32 ") DIÁMETRO NOMINAL EN MATERIAL CLASE 1.					
	AMPLIACIÓN DE 0.0 A 100.0 M. DE PROFUNDIDAD.	ML.	40.00	\$1,320.16	\$52,806.40	3.37
	COLOCACIÓN DE TUBERÍA DE ACERO PARA ADEME SOLDANDO LAS PUNTAS CON DOBLE CORDÓN AL ARCO ELÉCTRICO					
	COLOCACIÓN DE TUBERÍA DE 273.0 MM. (10 3/4") DIÁMETRO NOMINAL POR 6.4 MM. (1/4") DE ESPESOR.	ML.	180.00	\$156.30	\$28,134.00	1.80
	COLOCACIÓN DE TUBERÍA DE 406.4 MM. (16 ") DIÁMETRO NOMINAL POR 6.4 MM. (1/4") DE ESPESOR.	ML.	70.00	\$193.87	\$13,570.90	0.87
	COLOCACIÓN DE TUBERÍA DE 609.6 MM. (24 ") DIÁMETRO NOMINAL POR 6.4 MM. (1/4") DE ESPESOR.	ML.	40.00	\$250.48	\$10,019.20	0.64
	CIMENTACIÓN DE TUBERÍA DE DIVERSOS DIÁMETROS POR INYECCIÓN DE CEMENTO EN ESPACIO ANULAR PARA PERFORACIONES DE DIFERENTES DIÁMETROS, INCLUYENDO TIEMPOS DE OPERACIÓN DEL EQUIPO Y CEMENTO, ASÍ COMO ACARRFO 1 ER KM					
	CIMENTACIÓN DE POZOS CON TUBERÍA DE 609.6 MM. (24"). EN PERFORACIÓN DE 81.28 CM. DE DIÁMETRO NOMINAL.	ML.	40.00	\$1,356.80	\$54,272.00	3.47
	SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE GRAVA DE RÍO REDONDEADA LAVADA Y CRIBADA PARA FILTROS DE POZOS DE DIFERENTES DIÁMETROS INCLUYE ACARREO A 1 ER. KM.					
	GRAVA PARA FILTRO EN POZO DE 45.7 CM. (18") CON ADEME DE 273.0 MM. (10 3/4").	M3.	79.20	\$459.37	\$36,382.10	2.32
	GRAVA PARA FILTRO EN POZO DE 81.28 CM. (24") CON ADEME DE 406.4 MM. (16").	M3.	11.90	\$417.29	\$4,965.75	0.32
	SUBTOTAL				\$532,147.76	33.99
	ACUMILADO				\$1,019,059.70	65.09

CLAVE	CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE	%
	ACARREO DE BENTONITA DESDE EL SITIO DE SU ADQUISICIÓN HASTA EL SITIO DE LA OBRA.	TON.	120.00	\$149.30	\$17,916.00	1.14
	ACARREO DE EQUIPOS AUXILIARES, MATERIALES, TUBERÍAS 1 ER. KM. EN CUALQUIER TIPO DE CAMINO.	TON.	28.90	\$89.30	\$2,580.77	0.16
	ACARREO EN CAMINO PAVIMENTADO.	TON/KM.	508.00	\$10.30	\$5,232.40	0.33
	ACARREO EN CAMINO DE TERRACERÍA.	TON/KM.	70.00	\$15.40	\$1,078.00	0.07
	ACARREO DE AGUA EN CAMIONES TANQUE EN KMS. SUBSECUENTES AL PRIMERO.					
	ACARREO EN CAMINO PAVIMENTADO	M3/KM.	19,000.00	\$2.30	\$43,700.00	2.79
	ACARREO EN CAMINO DE TERRACERÍA.	M3/KM.	900.00	\$3.20	\$2,880.00	0.18
	ACARREO DE AGUA EN CAMIONES TANQUE 1 ER. KM. EN CUALQUIER TIPO DE CAMINO.	M3.	140.00	\$5.80	\$812.00	0.05
	LODO DE PERFORACIÓN PREPARADO CON AGUA DULCE Y BENTONITA, SIN ADITIVOS QUÍMICOS ESPECIALES DE 36 SEGUNDOS DE VISCOSIDAD EN PRUEBA DE VISCOSÍMETRO "MERSHUFNNEL".	M3.	175.00	\$220.65	\$38,613.75	2.47
	EXCAVACIÓN Y RELLENO DE FOSAS PARA LODOS DE 3 X 4 X 2 M.	PZA.	2.00	\$4,500.00	\$9,000.00	0.57
	EQUIPO DE BOMBEO PARA DESARROLLO Y AFORO DE POZOS CON GASTO DE 70 A 120 LPS. LONGITUD DE COLUMNA DE 150 M.					
	INSTALACIÓN Y DESMANTELAMIENTO DE EQUIPO DE BOMBEO DE 70 A 120 LPS. LONGITUD DE COLUMNA DE 150 M.	LOTE	1.00	\$1,040.23	\$1,040.23	0.07
	EQUIPO DE BOMBEO DE 70 A 120 LPS, 150 M. DE LONGITUD DE COLUMNA. ACTIVO.	HORA	60.00	\$310.20	\$18,612.00	1.19
	EQUIPO DE BOMBEO DE 70 A 120 LPS, 150 M. DE LONGITUD DE COLUMNA. INACTIVO.	HORA	5.00	\$830.10	\$4,150.50	0.27
	VIDEOGRAVACION DE POZO. REGISTRO CON CÁMARA DE T.V. SUBMARINA.	REG.	1.00	\$6,140.20	\$6,140.20	0.39
	REGISTRO ELÉCTRICO EN PERFORACIÓN EXPLORATORIA DEL POZO.	REG.	1.00	\$8,567.98	\$8,567.98	0.55
	SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE DISPERSOR DE ARCILLA	LT.	350.00	\$88.46	\$30,961.00	1.98
	SUMINISTRO DE TUBERÍA.					
	SUMINISTRO DE TUBERÍA DE ACERO RANURADA DE 10 3/4" X 1/4" DE ESPESOR.	ML.	152.00	\$1,630.85	\$247,889.20	15.83
	SUMINISTRO DE TUBERÍA DE ACERO LISA DE 16" X 1/4" DE ESPESOR.	ML.	70.00	\$754.21	\$52,794.70	3.37
	SUMINISTRO DE TUBERÍA DE ACERO LISA DE 24" X 1/4" DE ESPESOR.	ML.	40.50	\$1,030.58	\$41,738.49	2.67
	INSTALACIÓN DE TAPÓN DE FONDO A BASE DE CONCRETO f'c=200kg/cm2 de 0.50 M. DE ESPESOR.	PZA.	1.00	\$2,963.54	\$2,963.54	0.19
	ESTUDIO GEOFÍSICO EN LA LOCALIDAD.	E.G.F.	1.00	\$9,891.13	\$9,891.13	0.63
	SUTOTAL				\$546,561.89	34.91
	ACUMULADO				\$1,565,621.59	100.00
	TOTAL				\$1,565,621.59	100.00

(UN MILLÓN QUINIENTOS SESENTA Y CINCO MIL SEISCIENTOS VEINTIÚN PEOS 59/100 M.N.) SIN INCLUIR I.V.A.

EQUIPO DE BOMBEO

El equipo de bombeo que se utiliza en pozo profundo no. 308 es el siguiente:

- 1.- Un motor eléctrico de 150 H.P, a 1760 rpm, marca SIEMENS.
- 2.- Un cabezal de descarga Mod. 16 ½" x 8".
- 3.- 69.5 m (24 tramos) de columna de bombeo de 20.32 x 3.8 x 2.54 cm. (8" x 1"). La tubería de columna es de acero de alta calidad ASTM-A53 con rosca estándar NASSA-JOHNSTON. La flecha de transmisión es de acero al carbón rectificada y pulida, con calidad y precisión para bomba.
- 4.- Un cuerpo de seis tazones de 12" de diámetro, de hierro fundido con recubrimiento porcelanizado Mod. 12LC, marca FAIRBANKS-MORSE.
- 5.- U tubo de succión de 20.32 cm. (8") y 3.05 m. (10') de longitud.
- 6.- Un colador cónico de 20.32 cm. (8") de diámetro.

Para el diseño del equipo de bombeo se consideran básicamente los siguientes datos:

CDT = 114.5 m.

Q = 80 l/seg.

Donde:

CDT = carga dinámica total = CB + CAD

CB = carga en la bomba (es el nivel de bombeo más las pérdidas por fricción y velocidad que se tiene desde el cono de descarga hasta el cabezal de la bomba)

CAD = carga adicional en la descarga (es la carga que tiene que vencer la bomba a partir de su cabezal hasta el punto libre del sistema y comprende el desnivel topográfico y las pérdidas por fricción en la tubería de conducción y en los dispositivos instalados en ella, tales como válvulas, codos, tees, piezas especiales ,etc.)

Q = caudal requerido.

El equipo de bombeo trabaja las 24 hr.

Cabe mencionar que no se presenta el análisis detallado de la selección del equipo de bombeo, debido a que por su extensión está fuera del alcance de esta tesis.

CONSTRUCCION

A continuación se dan las especificaciones para la construcción de pozos profundos.

1.- REGISTRO DE PENETRACION

Durante la perforación deberán obtenerse muestras de los materiales atravesados a cada 2 m. de avance y muestras adicionales en los cambios de formación. Estas deberán guardarse en frascos de vidrio de aproximadamente 0.25 lts. de volumen, etiquetando el frasco con el nombre del pozo y número progresivo de la muestra, así como profundidad a la que corresponde. No deberán emplearse por ningún motivo frascos de plástico o similares. La muestra deberá ser fiel representativa del tramo de perforación atravesado.

Durante la perforación, el perforista o ingeniero residente deberá llenar las formas de registro diario de avance de la perforación. Estas formas deberán ser en original y dos copias, obligándose el contratista a hacer llegar a la parte contratante (dependencia del gobierno), cada semana, todas las muestras y los registros diarios de avance, correspondientes a la longitud perforada durante ese periodo.

Una vez alcanzada la profundidad definitiva del pozo, se correrá en éste el registro eléctrico correspondiente, que deberá proporcionar curvas de potencial natural, resistividad normal e inversa, para basándose en este registro y en los demás estudios se elabore el diseño del pozo.

2.- VERTICALIDAD Y ALINEAMIENTO

El pozo deberá pasar las pruebas de verticalidad y alineamiento.

a) Verticalidad.- En cualquier punto la desviación del ademe con respecto a la vertical, no deberá exceder al equivalente de un diámetro de ademe por cada 100 m. de profundidad del pozo. La vertical del ademe no tendrá tolerancia en la longitud correspondiente a la cámara de bombeo.

b) Alineamiento.- Consiste en poder introducir y extraer sin dificultad un tubo de 12 m. de longitud con una holgura máxima de 13 mm. (diámetro interior del ademe menos diámetro exterior del tubo que se introduce.)

3.- CEMENTACION

El contra ademe se cementará mediante inyección de cementación en el espacio anular que queda entre éste y la perforación.

4.- TAPON DE FONDO

Cuando los pozos requieren ademarse en toda su profundidad, ya sea a un solo diámetro o a diámetros decrecientes, será necesario que en el extremo inferior de la tubería más profunda, previamente su colocación, se fragüe en su interior un tapón de cemento de un metro de espesor.

5.- CONSTRUCCIÓN DE ADEME LISO Y RANURADO

El ademe se formará en tramos completos de tubería y cedazo, soldado a tope. Se emplearán soldaduras de alta resistencia a la tensión (E-6011, 6012 ó 6013), en cordones de 1.587 mm. (1/16") mayores que el espesor de la tubería, constituidos por lo menos de dos capas de soldadura, usando electrodos de diámetro igual o menor al espesor de la pared de la tubería, de acuerdo con las recomendaciones de la American Wilding Society (AWS). El ademe deberá quedar centrado en la perforación para lo cual deberá estar provisto de centradores @ 15 m .

La longitud total del ademe será tal que sobresalga 0.50 m del terreno natural.

La tubería entrará holgadamente en la perforación y deberá girar libremente cuando esté suspendida, no debiendo ser hincada a golpeo en ningún caso. Invariablemente la columna de ademe y cedazo deberá quedar colgada mediante anclaje adecuado desde la superficie del terreno.

La unión de los diversos tramos de ademe, cuando se trate de diámetros decrecientes, podrá estar constituida por simple traslape o por reducción de campana.

6.- FILTRO DE GRAVA

Una vez instalado el ademe, se procederá a colocar el filtro de grava en el espacio anular que queda entre la perforación y el tubo de ademe, de acuerdo con las características que se indiquen en el proyecto. La grava deberá estar limpia mediante lavado, deberá ser redondeada, lisa y uniforme de la granulometría que indique el proyecto, ya que estas características aumentan la permeabilidad y porosidad del material del filtro, además en un material uniforme tiene lugar una menor separación hidráulica de las partículas, cuando el filtro se esta calibrando o dejando que se asiente a una

profundidad considerable dentro del agua; se prohíbe el empleo de la grava triturada o de la obtenida de banco de préstamo que se encuentre angulosa o laminar. No se aceptará material para filtro de composición calcárea y fácilmente alterable, se preferirá la grava de cuarzo.

El filtro de grava se colocará por gravedad en el espacio anular entre la tubería de ademe y las paredes del agujero en forma lenta, con objeto de evitar puentes. Durante la formación del filtro se deberá pistonear para facilitar y activar el acomodo de la grava. Una vez que se haya terminado de engravar, se procederá a la limpieza del pozo mediante cuchareo, extrayendo todos los materiales y lodos que se hayan quedado por motivo de la perforación.

Si el diseñador del pozo sigue cuidadosamente las recomendaciones, podrá evitar que los pozos arrojen arena, ya que el diseño se basa en una relación apropiada entre el tamaño de grano de la formación y el del filtro de grava.

El Contratista deberá disponer de la existencia suficiente de grava ya que no se permitirá el inicio de una corrida de tubería de ademe sin disponer de la grava en el sitio.

7.- DESARROLLO

El desarrollo del pozo se realizará mediante bombeo, éste se iniciará con el caudal correspondiente al mínimo de revoluciones de trabajo del equipo de bombeo, este caudal se mantendrá constante hasta que el agua salga limpia (sin sólidos en suspensión), debiéndose, a partir de este momento, agitar el pozo en tres ocasiones consecutivas. Una vez efectuada esta operación si el agua continua sacando sólidos en suspensión, se repetirá el ciclo inicial; si por el contrario el agua sale limpia después de la agitación, se proseguirá con el desarrollo aumentando gradualmente en 100 el número de revoluciones de la bomba, procediendo en cada etapa a la agitación consecutiva por 3 veces al pozo, hasta que llegue al máximo de revoluciones que sea capaz de proporcionar el equipo de bombeo.

8.- AFORO

Una vez terminada la etapa de desarrollo, se iniciará el aforo, previo periodo de descanso, que permita recuperar totalmente el nivel estático. Con base en la información obtenida durante el desarrollo se elegirán 6 gastos crecientes uniformemente espaciados, correspondiendo el último al gasto máximo alcanzado durante el desarrollo, durante el aforo se bombeará por etapas sucesivas (6), cada una con duración de 4 horas; en las correspondientes a cambio de bombeo se efectuará doble medición, una 10 minutos antes y otra 10 minutos después del cambio. Durante la etapa de aforo, por ningún motivo se suspenderá el bombeo.

A 30 minutos de finalizar el aforo, se tomarán 2 muestras de agua, una para análisis bacteriológico y otro para análisis físico-químico, midiendo además la temperatura y el pH.

PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PARA EL POZO No. 308.

El siguiente programa se basa en la Norma Oficial Mexicana NOM-004-CNA-1996, "Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre definitivo de pozos en general".

1.- Desinfección periódica.

Después de que haya sido instalado el equipo permanente de extracción de agua del pozo e inicie su operación, éste debe desinfectarse como mínimo cada tres años. Para ello, deberá aplicarse proporcionalmente al volumen de agua contenido en el pozo el desinfectante necesario para que el cloro activo sea de 200 mg/L como mínimo.

El agua en el pozo deberá tratarse con cloro, tabletas de hipoclorito de calcio, solución de hipoclorito de sodio o cualquier otro desinfectante de efecto similar, con la concentración apropiada y aprobada por la Secretaría de Salud.

2.- Monitoreo de la calidad del agua.

Se deberán tomar muestras cada tres años, con objeto de efectuar un análisis fisicoquímico y bacteriológico del agua, de acuerdo con los métodos de análisis establecidos en Normas Mexicanas o los internacionalmente aceptados, que incluyan la determinación de pH, conductividad eléctrica, sulfatos, nitratos, cloruro, dureza total, calcio, sodio, potasio, sólidos disueltos totales y bacterias coliformes fecales.

Dependiendo de los resultados que se obtengan en el análisis fisicoquímico y bacteriológico del agua, se determinarán las acciones a seguir a fin de conservar la eficiencia original del pozo.

3.- Los niveles estático y dinámico se medirán por lo menos cada tres meses.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.- El agua subterránea se ha convertido en un elemento indispensable en el suministro a los diferentes usuarios, bien sea en las zonas áridas donde constituye la fuente de abastecimiento más importante y a menudo la única, o en las diferentes ciudades del territorio las cuales han tenido que recurrir a ella para cubrir sus crecientes requerimientos de agua.

En un número cada vez mayor de regiones, la reserva almacenada en el subsuelo será la principal y en ocasiones única fuente de agua para los diversos usos, por lo que los acuíferos se convierten en un recurso patrimonial estratégico, que debe ser manejado y administrado en forma eficiente para asegurar el desarrollo del país.

2.- La obra hidráulica en forma de una conducción vertical para la extracción de agua subterránea conocida como "pozo", es una obra muy particular, pues no es posible su correcto diseño hasta que no se inicie la obra; en otras palabras, el diseño de un pozo requiere necesariamente de una perforación exploratoria, en la cual se colectan muestras representativas de los estratos de suelos o rocas atravesados hasta alcanzar el manto acuífero y en el que se correrá además un registro eléctrico.

3.- Un pozo bien construido (evidentemente bien proyectado) ofrece las siguientes ventajas:

- a) Larga vida
- b) Caudal constante a través del tiempo, siempre que no existan problemas regionales que lo afecten.
- c) Agua libre de sólidos en suspensión.
- d) Proporciona condiciones adecuadas para conservar el equipo de bombeo.

Por lo tanto las dependencias gubernamentales o los particulares deben supervisar minuciosamente la construcción de un pozo profundo, tal como se hace en una obra superficial.

4.- No se debe pasar por alto el mantenimiento preventivo, ya que esta omisión genera costos elevados en el mantenimiento correctivo (rehabilitación).

5.- La construcción de pozos profundos es una herramienta que permite el aprovechamiento del agua subterránea disponible, evitando la sobreexplotación del recurso y los impactos inherentes de la misma hacia el ambiente, el bienestar social y el desarrollo económico.

6.- El pozo elegido para ejemplificar el diseño y construcción de un pozo profundo, fue el No. 308, ubicado en el municipio de Ecatepec, en el Estado de México.

- Ecatepec es uno de los municipios que más problemas tiene, en lo que se refiere al aprovisionamiento de agua. La creciente demanda que enfrenta esta entidad ha imposibilitado entregar agua potable suficiente a la población residente. Se estima que existe un déficit de alrededor de $1.5 \text{ m}^3/\text{seg}$.
- Del pozo 308 se extraen 80 l/seg, con lo que se beneficia a la población urbana circundante (zonas habitacionales, comerciales y servicios).
- En los trabajos de construcción del pozo 308 destaca la amplia experiencia de la empresa constructora, como un factor primordial en la realización de los trabajos, ya que minimizó los riesgos durante la ejecución de los trabajos.

7.- Este trabajo se presenta como una guía de apoyo, conteniendo las teorías, las variables y los criterios prácticos mas importantes para el diseño, construcción y mantenimiento de pozos profundos para la extracción de aguas subterráneas.

De ninguna manera, esta guía resuelve todos los problemas de diseño de pozos, por lo que, se tendrán que hacer los ajustes necesarios, según las condiciones que se presenten en la zona a explotar el agua subterránea en cada caso real, contando con una completa información de la zona y la experiencia del ingeniero de diseño y del perforista.

BIBLIOGRAFÍA**1.- "HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA"**

Custodio y Llamas

Ed. Omega.

2.- "LA CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS"

Jean Pimienta

Editores Técnicos Asociados.

3.- "PERFORACIÓN DE POZOS PARA RIEGO"

Rafael Álvaro Jiménez Granado

4.- "MANUAL DE POZOS PEQUEÑOS"

Ulric p Gibson y Rexford D Singer

Ed. Limusa

5.- "CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS"

Alberto Benítez

Ed. Dossat S.A.

6.- CURSO DE EDUCACIÓN CONTINUA DE LA UNAM

"PERFORACIÓN, REHABILITACIÓN Y AFORO DE POZOS PARA AGUA"

Mayo de 1991.

7.- "AGUA SUBTERRÁNEA"

Michael Price

Ed. Limusa.

8.- "EL AGUA SUBTERRÁNEA Y LOS POZOS"

Jonson Division, UOP Inc.

Primera Edición 1975.

9.- "ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN DE POZOS"

American Water Works Association

Serie funcionamiento de pozos parte I.

10.- "GEOHIDROLOGÍA"

R. Chávez Guillén, A. List Mendoza, L. P. Martínez, J. M. Lesser Illades.

Universidad Autónoma de Chapingo.

11.- "MANUAL DE DISEÑO DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO"

Comisión Nacional del Agua 1994.

12.- CURSO DE EDUCACIÓN CONTINUA DE LA UNAM

"HIDRAULICA Y DISEÑO DE POZOS"

Diciembre de 1987.

13.- CURSO DE EDUCACIÓN CONTINUA DE LA UNAM

"CURSO INTERNACIONAL DE GEOHIDROLOGÍA Y CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS"

Septiembre de 1989.

14.- "ABASTECIMIENTO DE AGUA Y ALCANTARILLADO"

Ernest W. Steel

Ed. Gustavo Gili S.A. Barcelona.

15.- "MECÁNICA DE SUELOS TOMO III"

Eulalio Juárez Badillo

Ed. Limusa.

16.- "HIDROLOGÍA PARA INGENIEROS"

R. K. Linsley. M. A. Kohler y J.L. Paulhus

17.- "APUNTES DE LA CLASE DE LA MATERIA DE GEOHIDROLOGÍA"

Athala M. J.

Ingeniería Civil, ENEP Acatlán-UNAM

México, 2003.