



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS "ARAGÓN"**

**LOCALIZACIÓN DEL SITIO PROPICIO PARA
EL DISEÑO DE POZOS PROFUNDOS**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A:

GERMÁN MONTIEL LARA

**DIRECTOR DE TESIS:
ING. GERARDO TOXKY LÓPEZ**

MÉXICO 2005



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

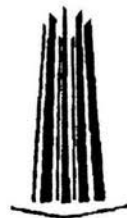
DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ARAGÓN"



**"LOCALIZACIÓN DEL SITIO PROPICIO PARA
EL DISEÑO DE POZOS PROFUNDOS"**



AGRADECIMIENTOS.A MI PADRE:

ELPIDIO MONTIEL, POR BRINDARME TU CONFIANZA, SIN RESERVA ALGUNA.

A MI FAMILIA:

POR TODO EL APOYO Y ALIENTO QUE SIEMPRE ME MANIFESTARON, PARA PODER CONCLUIR ESTE TRABAJO, A PESAR DEL TIEMPO TRANSCURRIDO.

AL INGENIERO DIRECTOR:

POR BRINDARME EL APOYO INTELECTUAL, DURANTE LA ELABORACIÓN DE ESTE TRABAJO Y POR COMPARTIR SU EXPERIENCIA COMO INGENIERO Y PROFESOR, PARA PODER CONCLUIR ESTA ETAPA.

A MI UNIVERSIDAD:

POR DARMER LA OPORTUNIDAD DE CURSAR ESTA CARRERA Y A LA VEZ PODER REALIZARME COMO PROFESIONAL.

A MIS PROFESORES:

A TODOS Y CADA UNO, POR LA ENSEÑANZA QUE ME IMPARTIERON AÑO CON AÑO.

ÍNDICE.

Agradecimientos.	1
Índice.	2
Introducción.	3
CAPÍTULO I. GENERALIDADES.	5
1.1 Cuerpos de agua.	5
1.2 Aprovechamiento de los cuerpos de aguas superficiales.	8
1.3 Aprovechamiento de las aguas subterráneas.	10
CAPÍTULO II. MÉTODOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE ACUÍFEROS.	14
2.1 Métodos geológicos.	14
2.2 Métodos geofísicos.	17
2.3 Registros en perforaciones de exploración.	25
2.4 Perforaciones para exploración.	27
CAPÍTULO III. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE POZOS.	29
3.1 Diseño de pozos.	29
3.2 Procedimientos de perforación.	33
3.3 Colocación de ademe, contra-ademe y cementación.	63
3.4 Colocación del filtro.	77
CAPÍTULO IV. TERMINACIÓN DE POZOS.	79
4.1 Procedimientos de lavado primario.	79
4.2 Selección del equipo para el desarrollo por bombeo y el aforo.	82
4.3 Desarrollo de pozos.	84
4.4 Realización del aforo del pozo y gráfica gasto-abatimiento.	89
4.5 Selección del equipo de bombeo definitivo.	99
CAPÍTULO V. CALIDAD DEL AGUA.	102
5.1 Calidad física.	102
5.2 Calidad química.	102
5.3 Calidad microbiológica.	105
5.4 Calidad radiactiva.	106
CAPÍTULO VI. DISEÑO DEL POZO UBICADO EN DURAZNO NO. 2 DEL MUNICIPIO DE JEREZ, ZACATECAS.	107
Conclusiones.	115
Bibliografía.	116
Glosario.	117

INTRODUCCION.

El objetivo de este trabajo, "LOCALIZACIÓN DEL SITIO PROPICIO PARA EL DISEÑO DE POZOS PROFUNDOS", es el título del presente trabajo que, como TESIS PROFESIONAL, he elaborado cubriendo uno de los requisitos para obtener el título de la Licenciatura en Ingeniería Civil.

Este trabajo de tesis consta de seis capítulos a lo largo de los cuales se presenta el diseño, construcción y terminación de pozos profundos.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES. Consiste en una breve exposición de la distribución del agua dulce, la cual da origen a los diferentes cuerpos de agua: arroyos, ríos, lagos, lagunas, acuíferos, etc.; así como algunos prototipos de tomas de agua de cuerpos superficiales y subterráneos poco profundos (máximo 30 metros), para uso y consumo humano.

CAPÍTULO II: MÉTODOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE ACUÍFEROS. Presenta los métodos, para establecer la probabilidad de que en un sitio determinado, se encuentren cuerpos de agua subterráneos (con profundidades mayores de 30 metros). Se inicia con una investigación geológica, donde se evalúan los mapas geológicos de la zona, fotografías aéreas e indicios de la superficie, como vegetación, corrientes y depósitos de agua. Se exponen las prospecciones geofísicas: gravimétrica, magnética, sísmica y sondeos geoelectrónicos. Se indica la realización de registros eléctricos o rayos gama, cuando existen perforaciones en el sitio de elegido para el pozo.

CAPÍTULO III: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE POZOS. Muestra los parámetros que se utilizan para la realización del diseño y construcción de un pozo. Dentro del diseño se establecen: profundidad, diámetro de perforación, elección del ademe y filtro. En la construcción se valoran los equipos de perforación existentes, la elección del equipo adecuado para el trabajo, que depende del tipo de formaciones que se perforan; la realización del programa de perforación: toma de muestras de las formaciones perforadas, para efectuar la granulometría y corrida del registro eléctrico; por último se aprecian diferentes procedimientos de cementación que se requieren durante la elaboración de los pozos.

CAPÍTULO IV: TERMINACIÓN DEL POZO. Contiene la etapa posterior a la construcción del pozo. Consiste en la presentación de los diferentes métodos de lavado primario, que se realizan con el equipo que realizó la perforación. Los procesos de desarrollo: químico, neumático y mecánico. Presenta la ejecución del aforo, para la obtención de datos, para realizar la elección del equipo de bombeo para la explotación del pozo y la ubicación de la cámara de bombeo.

CAPÍTULO V: CALIDAD DEL AGUA. Muestra los límites permisibles de las características físicas, químicas, microbiológica y radiactivas del agua, indicando como se efectúa la toma de muestras para efectuar el análisis. Los parámetros para realizar un análisis físico es: sabor, olor, color y turbiedad. El análisis químicos determina el contenido de minerales, de acuerdo con éste se determina el uso adecuado del agua. El análisis bacteriológico, determina la potabilidad del agua.

CAPÍTULO VI: DISEÑO DEL POZO UBICADO EN DURAZNO No. 2, DEL MUNICIPIO DE JEREZ, ZACATCAS. Expone el diseño y construcción del pozo, con datos reales, presentando el sondeo geoelectrico, cornda del registro eléctrico, el corte geológico y la granulometría de las formaciones perforadas, la correlación de estos datos, determina los tramos de tubería lisa, productora y colocación del filtro de grava.

Como parte final, expongo las conclusiones que me dejó la elaboración de este trabajo, así como algunas recomendaciones acerca de la explotación de los acuíferos.

Las referencias bibliográficas se muestran, de acuerdo con la importancia que tienen en la realización de dicho trabajo.

Finalmente se presenta un glosario de términos, para aclarar los conceptos del trabajo y tener un mejor entendimiento de éste.

I. GENERALIDADES.

Debido a la necesidad que se tiene del agua para el uso y consumo humano, se han tenido que explotar los diferentes cuerpos de agua; tanto superficiales (ríos, lagos, embalses, etc.), como subterráneos (acuíferos).

Para tener un aprovechamiento adecuado del agua se debe conocer el ciclo hidrológico, así como las características de los cuerpos de agua, para determinar los volúmenes que se pueden obtener de cada uno de estos, sin que se vean afectados.

1.1 CUERPOS DE AGUA.

Es necesario conocer los procesos y factores que afectan el origen, existencia y circulación del agua de acuerdo al ciclo hidrológico, esto para tener un aprovechamiento adecuado de las diferentes fuentes de captación.

El ciclo hidrológico consiste en la circulación del agua que va de un estado líquido, a uno gaseoso; debido a la evaporación del agua de ríos, lagos, océanos, etc., que forman las nubes; estas liberan su humedad como precipitación, en forma de lluvia, granizo, nieve, etc.; parte de esta precipitación llega a la superficie, donde escurre hacia los ríos, lagos; otra parte se infiltra en el subsuelo, donde se integra a un flujo que la lleva a los acuíferos, donde queda confinada o fluye a los océanos. En la figura 1.1 se ilustra el ciclo hidrológico.

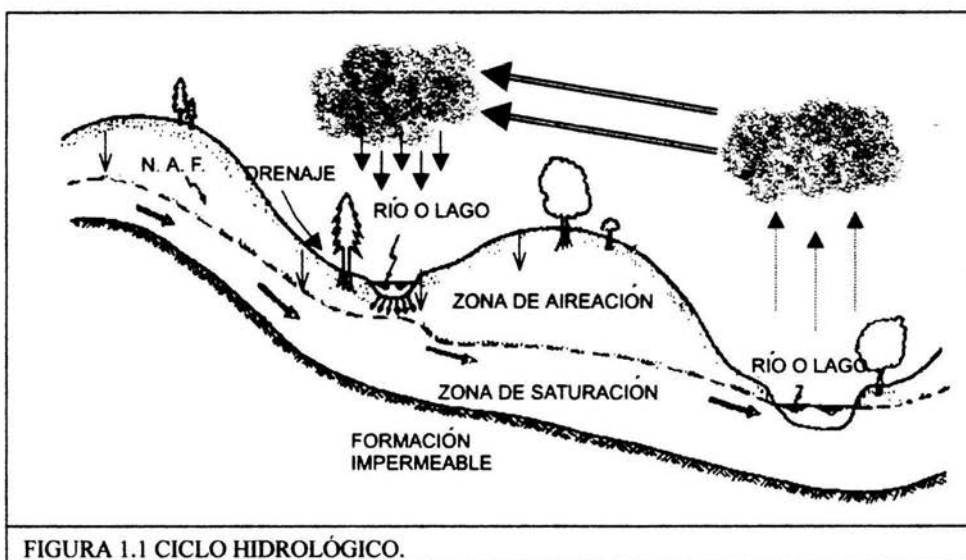


FIGURA 1.1 CICLO HIDROLÓGICO.

El agua que no se filtra al subsuelo y escurre superficialmente, forma arroyos y ríos; esto de acuerdo a la topografía del lugar, hasta desembocar en lagunas, lagos, mares u océanos.

La distribución del agua que se encuentra en el subsuelo, considera dos zonas: la primera denominada de aireación, donde se encuentran partículas sólidas, de agua y aire; y la segunda llamada de saturación, la cual se encuentra por debajo de la primera, en esta zona, se hallan partículas sólidas y de agua, las moléculas de agua son las únicas que fluyen hacia el pozo, cuando el subsuelo es permeable. La frontera entre estas dos zonas se conoce como nivel de aguas freáticas (N. A. F.).

Las formaciones que contienen y transmiten agua del subsuelo en cantidades suficientes para alimentar manantiales o pozos, se conocen con el nombre de acuíferos, estos se clasifican geológicamente y de acuerdo a las capas freáticas o artesianas.

Dentro de la clasificación geológica existen cuatro grandes grupos: estratos granulares, juntas por fracturamiento de las rocas, túneles en lavas y cavidades formadas por disolución.

Estratos granulares. Son conjuntos de partículas producidas por la erosión y depositadas en los valles, entre las cuales existen intersticios comunicados entre sí por los que circula el agua. Su porosidad varía de acuerdo al grado de compactación, se pueden ver estructuras sueltas en las cuales las partículas apenas se tocan entre sí; en cuanto a las estructuras compactas, las partículas se tocan en un mayor número de puntos y no dejan entre sí más que vacíos reducidos. Las rocas sedimentarias y las metamórficas en ciertos casos se pueden considerar dentro de esta clasificación. Entre las estructuras sueltas, se encuentran sedimentos de reciente formación no consolidados, que han retenido una gran cantidad de agua, como los limos, arcillas, fangos, arenas y gravas.

Juntas por fracturamiento. Son fisuras o fracturas contenidas en las formaciones rocosas, causadas por el enfriamiento rápido de las rocas volcánicas, la presión producida en los mantos de rocas metamórficas o producidas por movimientos tectónicos. La porosidad de las rocas fisuradas o fracturadas, depende de la cantidad de hendiduras y su abertura.

Túneles en lavas. Se presenta cuando en el proceso de las emisiones de lava, esta viene acompañada de grandes volúmenes de gases, los cuales quedan atrapados dentro de las lavas y al solidificarse, producen cavidades y túneles, que imprimen una porosidad elevada. Si estas cavidades o túneles están conectados entre sí, son óptimos conductos para que el agua circule entre la roca y se conviertan en un excelente acuífero, sin embargo, si las cavidades permanecen aisladas, la roca no podrá tener una porosidad elevada por lo tanto no funciona como acuífero.

Cavidades formadas por disolución. Se presentan en las rocas solubles como las calizas y el yeso, estas se ven frecuentemente atacadas por el agua que se encuentra en las fisuras, la cual va disolviendo la roca, incrementando el ancho de las fisuras hasta formar túneles y cavernas, en algunos casos pueden alcanzar dimensiones extraordinarias. La porosidad en estas rocas depende del diámetro y densidad de los túneles.

La siguiente clasificación de acuíferos es considerando capas freáticas y artesianas:

Acuífero de capa freática. Es el que no está confinado por una capa superior impermeable, también se le conoce como manto acuífero no cautivo, el agua de estas capas se encuentra prácticamente a presión atmosférica.

Acuífero artesiano. Es aquel en el cual el agua está confinada bajo una presión mayor a la atmosférica, debido a una capa superpuesta relativamente impermeable. Este tipo de capa también se llama cautiva o a presión.

De acuerdo a los tipos de acuíferos se hace una relación de pozos: pozo de capa freática, pozo artesiano sin flujo y pozo artesiano de flujo. En la figura 1.2 se muestran estos tipos de pozos.

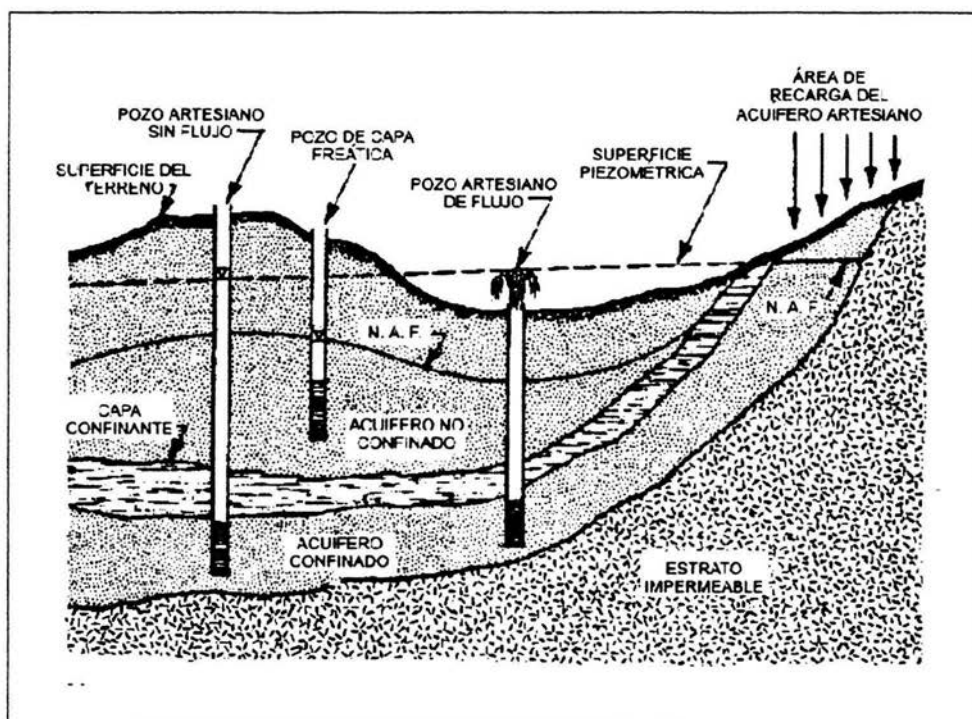


FIGURA 1.2 POZOS ARTESIANOS Y DE CAPA FREÁTICA.

Pozo de capa freática. Consiste en una perforación en el terreno, la cual llega al estrato del acuífero de la capa freática, en el cual el nivel del espejo del agua es igual al del N. A. F.

Pozo artesiano sin flujo. Es una perforación en el terreno, la cual llega hasta el acuífero confinado y la parte superior del brocal queda por encima de la superficie piezométrica. El espejo del agua de este pozo, queda a la altura de la superficie piezométrica, esta superficie es igual a la altura donde el estrato confinado se encuentra

con la superficie del terreno, en el área donde se recarga dicho acuífero. Si el estrato confinado tiene diferentes puntos o áreas donde toca la superficie, el punto más bajo de recarga define la superficie piezométrica.

Pozo artesiano de flujo. Es similar al anterior, pero en este caso el brocal queda por debajo de la superficie piezométrica, provocando que el agua brote del pozo.

Aparte de los acuíferos existen otras formaciones impermeables, las cuales se dividen en dos clases: los acuicierres y los acuifugos.

Los acuicierres. Son aquellas formaciones que pueden contener agua, pero son incapaces de conducirla y transmitirla en cantidades significativas.

Los acuifugos. Estos no contienen agua libre ni pueden conducirla. Estas capas impermeables constituyen fronteras de flujo, ya que actúan como confinantes entre los acuíferos.

La explotación de las aguas subterráneas se realiza: en manantiales, éstas brotan en la superficie, mientras las que se encuentran en el subsuelo, se extraen mediante galerías filtrantes, pozos poco profundos (menores de 30 metros) y profundos.

1.2 APROVECHAMIENTO DE LOS CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES.

Los factores hidrológicos que intervienen en el desarrollo del abastecimiento de aguas superficiales deben considerar para su diseño y operación: la preparación y control de las áreas de captación, la selección y tratamiento de las áreas para los depósitos y el manejo de estanques y lagos naturales, así como de los embalses; la dimensión, construcción y mantenimiento de las obras de ingeniería necesaria, incluyendo presas y diques, estructuras de toma, vertedores, cámara de bombeo, etc.

Los terrenos de captación de aguas superficiales varían en tamaño, desde unas cuantas hectáreas (30 en Laguna de Quecholac, Puebla), hasta del orden de 3500 kilómetros cuadrados en la Presa Nezahualcoyotl, Chiapas. Los cuerpos más utilizados son los ríos: se tienen obras de toma en sus cauces, también forman grandes embalses por medio de presas, siendo estos cuerpos los de mayor tamaño en el mundo.

Para gastos pequeños en la toma directa de ríos se puede emplear un tubo, sin embargo el fondo debe ser lo suficientemente estable, y el agua lo bastante profunda para permitir que la captación quede sumergida todo el tiempo, por lo menos un metro. Si el nivel del río varía considerablemente, se utilizan captaciones en la orilla, estas se sitúan por encima del nivel de las aguas bajas y consiste en un túnel paralelo a la corriente con una o más entradas, estas en comunicación con el agua del río. Las entradas deben estar protegidas con rejillas.

Cuando se requiere de grandes gastos, en uno de los bordos del río se realiza un canal, este se debe proteger con rejillas, el cual capta el agua, a un tanque de sedimentación, del cual pasa a una cámara de bombeo para enviarla a un depósito para su distribución.

Cuando en el cauce del río se construye una presa, se forma un embalse. El cual debe cumplir con los siguientes requisitos:

1.-Una topografía que genere una relación baja del volumen de la cortina con respecto al volumen del agua almacenada; por ejemplo una garganta angosta para la presa y un valle amplio para el embalse.

2.-Una geología que asegure: cimientos seguros para la cortina y estructuras; hermeticidad contra la filtración a través de los empotramientos y evitar redes de flujo bajo la presa; materiales tales como arena, grava y arcilla, para la construcción de la cortina y estructuras auxiliares.

3.-Un valle escasamente habitado, este no deberá ser pantanoso, arbolado y preferentemente de suelo impermeable.

La toma de agua de un embalse (presa) se efectúa mediante túneles protegidos con rejillas finas y con sus respectivas válvulas. Estos túneles se encuentran a diferentes profundidades (el túnel más bajo a 10 metros sobre fondo del embalse) debido a la variación del nivel de la presa y también para regular la temperatura del agua, la velocidad de esta al pasar por las rejillas debe ser menor de 0.60 m/s. Los túneles descargan a un depósito, como se muestra en la figura 1.3.

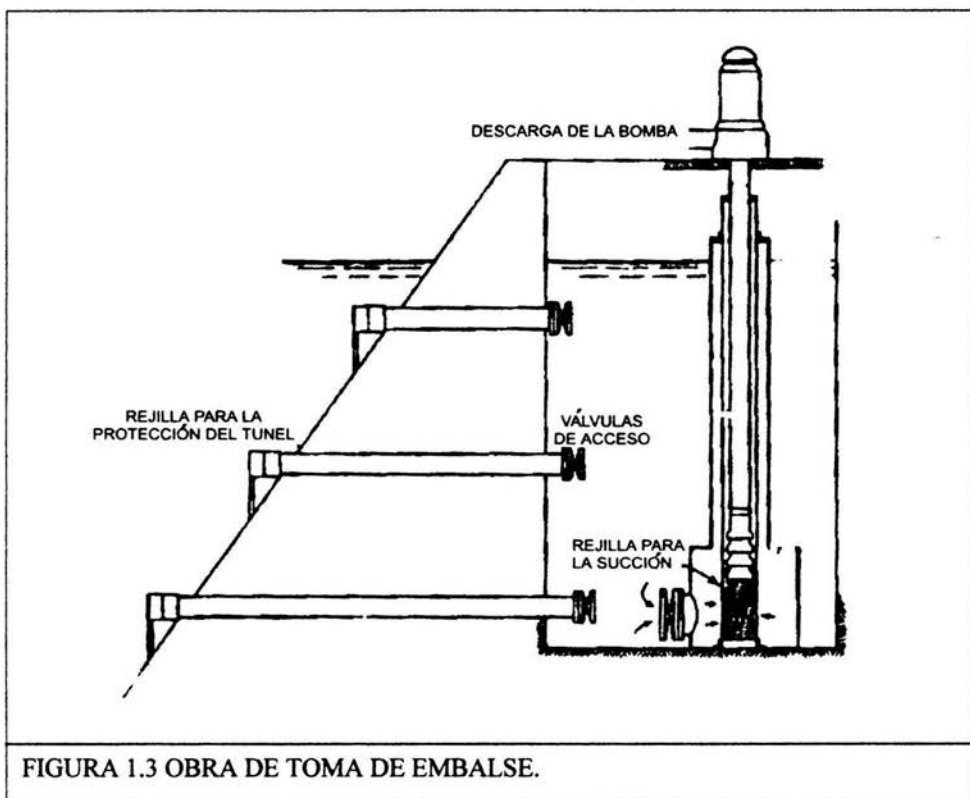


FIGURA 1.3 OBRA DE TOMA DE EMBALSE.

Los lagos son otros cuerpos de agua donde se realiza la extracción de ésta, en lagos profundos es conveniente ubicar la toma del agua entre 40 a 50 metros; esta toma normalmente es una coladera, debe estar por lo menos dos metros por encima del fondo del lago y tener una velocidad de entrada de 0.15 m/s, para evitar remover los sedimentos, como se muestra en la figura 1.4. En lagos cuya profundidad sea menor a 40 metros, la obra de toma estará entre 4 a 6 metros del nivel mínimo del agua, y consiste de un tubo el que dispone de un colador o rejilla, esta toma se localiza donde el peligro de contaminación sea mínimo y alejado de las desembocaduras de corrientes y sedimentos.

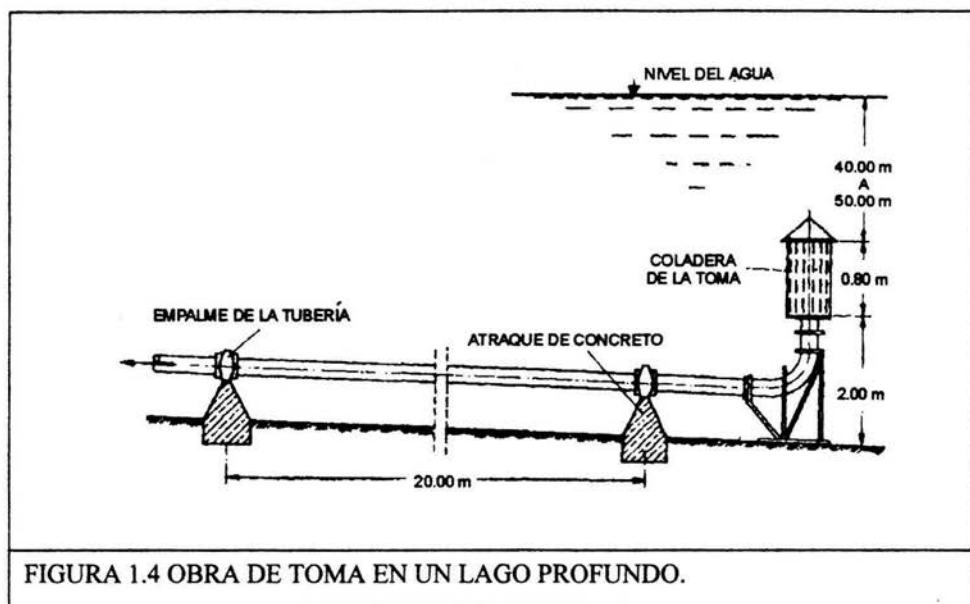


FIGURA 1.4 OBRA DE TOMA EN UN LAGO PROFUNDO.

1.3 APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.

De acuerdo a la explotación que se realiza en este tipo de aguas, se clasifican en poco profundas y profundas.

a) Aguas poco profundas.

Se consideran como aguas subterráneas poco profundas las de los mantos freáticos, entre las que se encuentran: los manantiales y los pozos poco profundos (menores de 30 metros).

Normalmente el agua que brota de los manantiales es un gasto pequeño, su obra de toma, consiste en una cámara formada por una estructura con un muro descubierto, esta cámara se utiliza para proteger el manantial de: corrientes superficiales, polvo, basura, animales, etc. El muro de la cámara se debe desplantar sobre material resistente e impermeable, cuidando de no tocar los puntos de filtración, para no provocar su desaparición o cambio de comportamiento hidráulico. Cuando existen varios manantiales

en la zona de afloramiento se captan en forma individual y mediante conductos se reúnen en un cárcamo para su distribución.

Dentro de los pozos poco profundos se tienen varios tipos: pozos a cielo abierto, pozos entubados y pozos radiales.

Pozos a cielo abierto. Tienen un diámetro mínimo de 1.50 metros, y una profundidad comprendida entre 10 y 20 metros, la cual raras veces podrá ir más allá de los 25 metros. Si la pared del pozo es de concreto, la parte situada en el estrato permeable debe llevar perforaciones de acuerdo con un estudio previo granulométrico, pero si no se dispone de estos datos, se recomienda que el diámetro de las perforaciones sea de 2.5 a 5 cm, para pozos con ademe de mampostería, piedra o tabique, se dejarán espacios sin juntear en el estrato permeable, procurando apegarse a la consideración anterior. El brocal del pozo debe tener como mínimo 50 cm sobre nivel del terreno y la tapa debe ser de concreto armado con una saliente perimetral de 50 cm. Si el pozo se encuentra dentro o cerca de una zona poblada se debe localizar en un punto alto con respecto a la contaminación y alejado de ellos a una distancia mínima de 25 metros.

Pozo entubado. Consiste en un tubo forrado, que tiene en su extremo un taladro en forma de punta, de diámetro ligeramente superior al de la tubería. Encima del taladro se coloca tubería ranurada o de rejilla, a través de la cual entra el agua, como se muestran la figura 1.5, el hincado se efectúa por medio de un mazo o por la caída de un peso, ya sea por medios manuales o con la ayuda de máquinas. Los pozos entubados tienen usualmente un diámetro de 3 a 10 cm y llegan a tener una profundidad de 15 metros, este tipo de procedimiento se utiliza sólo en suelos arenosos no consolidados.

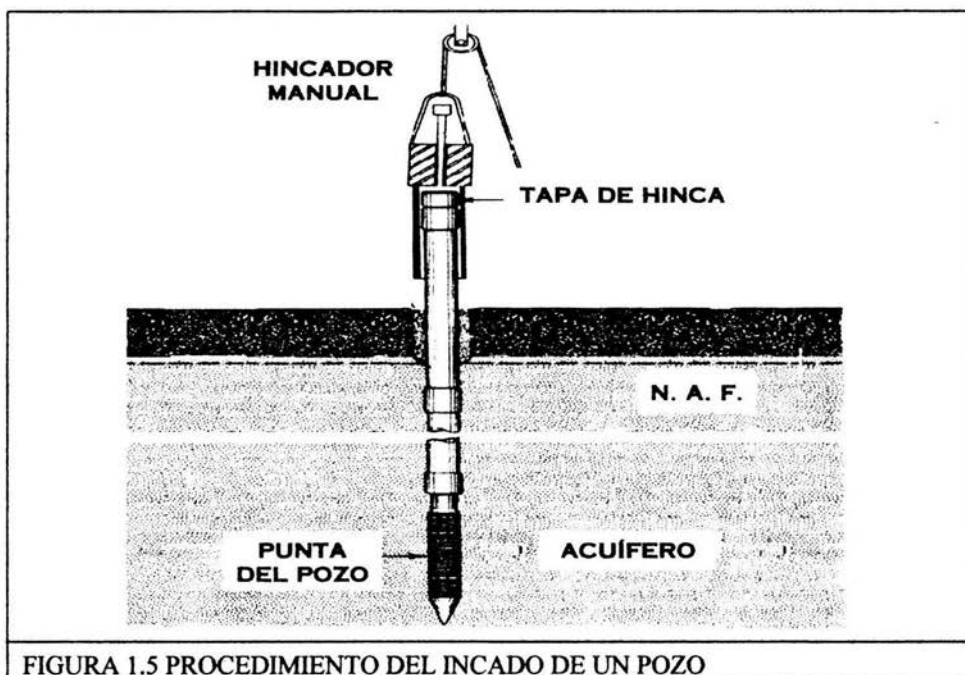
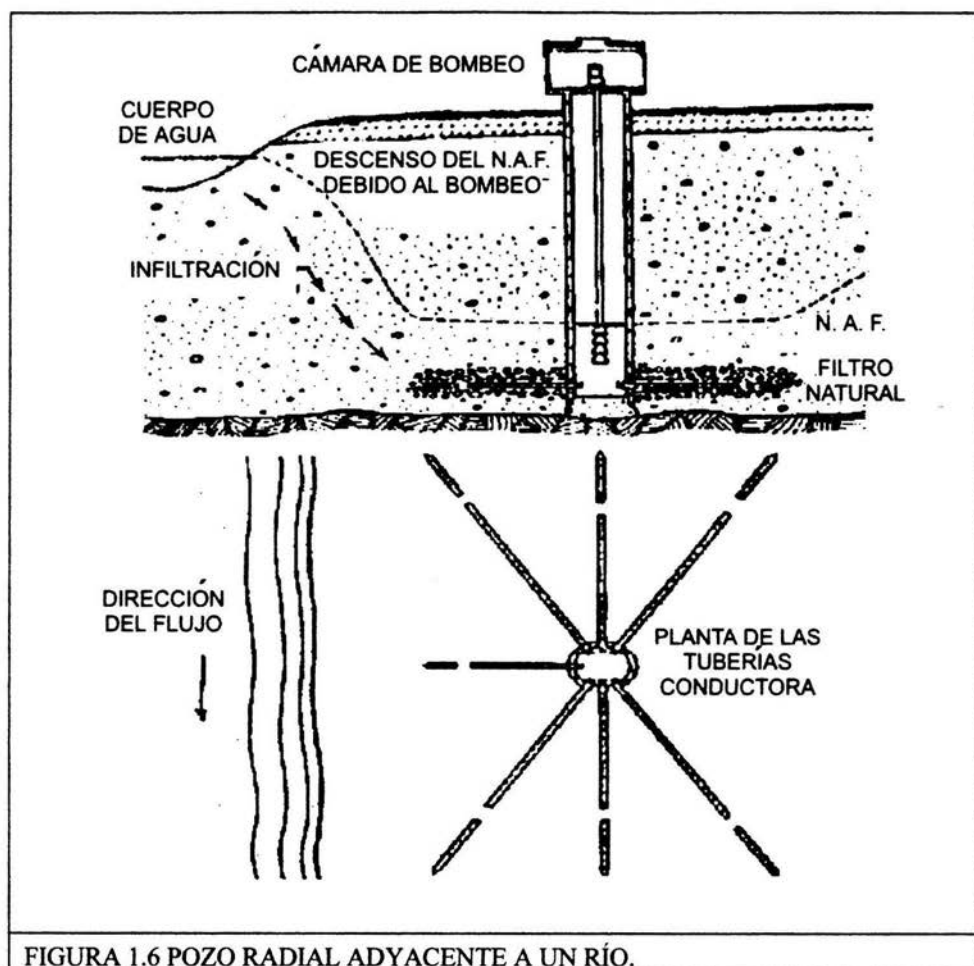


FIGURA 1.5 PROCEDIMIENTO DEL INCADO DE UN POZO

Pozos radiales. Estos obtienen el agua de los acuíferos, también se instalan adyacentes a manantiales o corrientes de agua, donde sirven para aumentar la filtración de estos hacia el pozo. Su construcción consiste en un pozo central de concreto armado, de un diámetro interior mínimo de cuatro metros cuyo fondo debe estar cerrado de preferencia con concreto armado, a 1.20 metros del fondo del pozo y en orificios dejados en las paredes del mismo, se introducen horizontalmente algunos tubos con ayuda de gatos hidráulicos, los tubos llevan una punta para facilitar su penetración en el terreno y unos anillos que sirven de guía al tubo. El número, longitud y colocación de los tubos, depende de las condiciones particulares de cada región, la longitud total del colector varía de 30 a 60 metros por cada tubería. Los tubos se colocan combinando la extracción y la contracorriente, eliminándose así durante este proceso una gran parte del material fino y desarrollándose una pared de grava natural alrededor del colector. Los colectores regularmente se disponen como se indica la figura 1.6 y tienen diferentes longitudes, dependiendo si se trata de la explotación de: un acuífero freático, manantiales o cuerpos de agua superficiales.



b) Aguas profundas.

La explotación de estas aguas se realiza por medio de pozos, los cuales tienen una profundidad mayor a 30 metros, estos explotan acuíferos freáticos y artesianos; dependiendo de la calidad del agua de dichos acuíferos.

Los pozos profundos captan el agua de los acuíferos artesianos, tienen diámetros de perforación que varían de 35 a 75 cm y sus profundidades van de 30 hasta 650 metros. El diámetro del ademe, que es un tubo de acero, varía de 25 a 60 centímetros, la diferencia entre el diámetro de la perforación y el del ademe, normalmente se rellena con un filtro de grava; el diseño, construcción y terminación de este tipo de pozos se verá en los capítulos tercero y cuarto.

II. MÉTODOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE ACUÍFEROS.

Toda perforación para pozo profundo cuyo propósito sea la explotación de aguas subterráneas, debe realizarse en el lugar previamente seleccionado.

La ubicación del sitio correcto para la perforación de un pozo que produzca un abastecimiento constante de agua durante todo el año (en cuanto a calidad y cantidad), suele ser el trabajo de ingenieros especializados en hidrología y geohidrología, sin menospreciar a los "varitonos", ya que no se puede lograr por la sola agitación de una horquilla mágica la localización de agua, debido a que esta se puede encontrar casi en cualquier parte bajo la superficie de la tierra.

Para identificar y localizar las aguas subterráneas se requiere de una serie de estudios previos. Hoy día hay poderosos métodos auxiliares y herramientas modernas, que facilitan el trabajo de investigación de hidrólogos y geohidrólogos. La geología, aerofotogrametría y geofísica, disponen de métodos que permiten obtener valiosa información para localizar los acuíferos, aún cuando algunos de estos métodos requieren del auxilio de muestreos y perforaciones para su correcta información (estas perforaciones pueden ser pozos existentes en la zona o perforaciones especialmente realizadas para la exploración).

2.1 MÉTODOS GEOLÓGICOS.

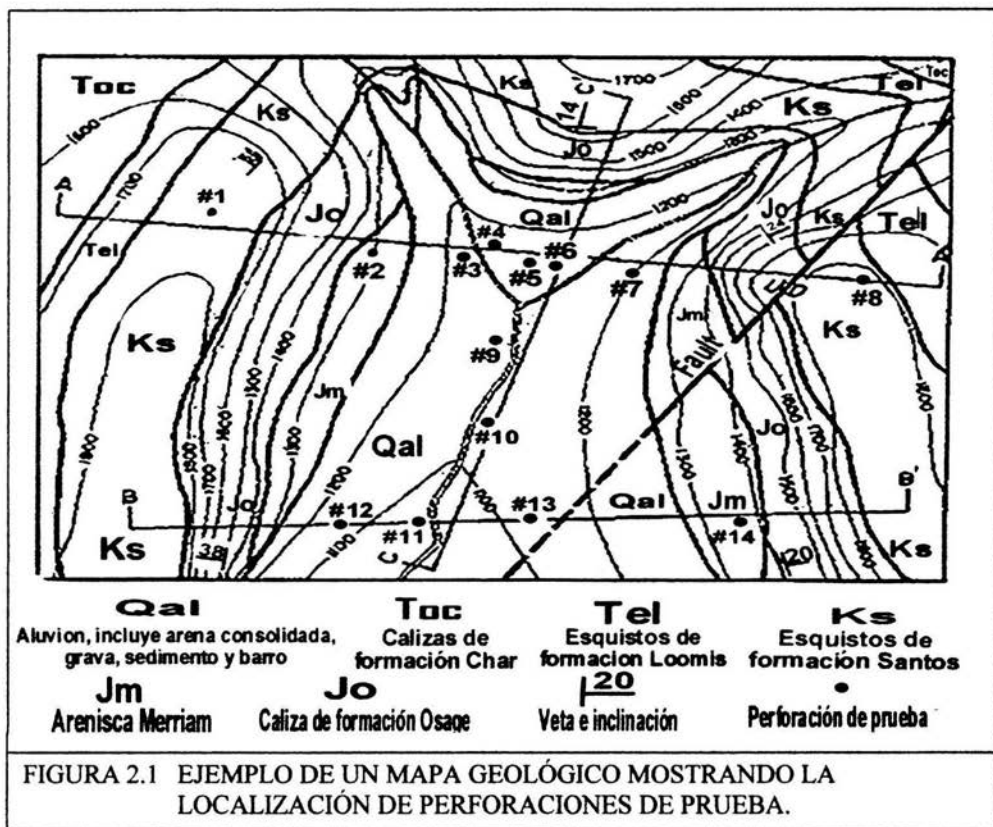
El empleo de los datos y mapas geológicos disponibles de una región, aunado a reconocimientos geológicos específicos, proporciona una estimación de las condiciones hidrológicas. Estos métodos deben considerarse como el primer paso en toda valoración del recurso del agua subterránea, la información respecto a las formaciones y estructuras geológicas de la región; ya que esto permite indicar el método más adecuado para las exploraciones que se requieren.

a) Mapas geológicos.

Los mapas geológicos, muestran los puntos en que las diferentes formaciones rocosas, consolidadas o no, salen o afloran a la superficie de la tierra, su veta o la dirección en la que descansan, su inclinación o el ángulo que tiene con respecto a la horizontal. Otra información útil que se debe incluir es: la localización de fallas y curvas de nivel indicando la profundidad. Estos datos los podemos apreciar en la figura No. 2.1.

Las fallas son líneas de fractura alrededor de las cuales están relativamente desordenadas las formaciones de roca y son el resultado de fuerzas que actúan en la tierra y causan derrumbes laterales, deslizamientos o levantamientos. El geohidrólogo determina la ubicación y extensión superficial de las capas acuíferas por el tipo y localización del afloramiento de rocas y la ubicación de las fallas. Las fallas también son sitios probables para la aparición de arroyos. El ancho de la afloración y el ángulo de inclinación, indican el espesor aproximado de una capa acuífera y las profundidades a las que puede encontrarse. La combinación de la veta y la inclinación, indican en que dirección debe localizarse el pozo para obtener el espesor máximo de la capa acuífera.

Las afloraciones de la superficie también indican las posibles áreas de recarga para una capa acuífera y, por deducción la dirección del flujo en ella. El contorno del lecho de roca indica la profundidad máxima a la que debe perforarse un pozo en busca de agua.



b) Aerofotogrametría (Fotografías aéreas).

Una interpretación hábil de las fotografías proporciona valiosa información sobre las características del terreno, que influyen considerablemente en la existencia de agua en el subsuelo.

Las características que indican las condiciones del subsuelo, tales como la vegetación, la forma y el uso de la tierra, erosión, cauces de drenaje, terrazas, planos aluviales y depósitos de grava son evidentes en las fotografías.

El interprete de las fotografías puede determinar las zonas más prometedoras para el alumbramiento de las aguas subterráneas.

c) Indicios en la superficie.

El Geohidrólogo o el Hidrólogo al visitar la zona y efectuar una observación mas cercana de cualquier indicio superficial de agua subterránea, examinará con mayor detalle las características superficiales importantes que había observado en los planos topográficos y fotografías aéreas.

Entre las características que proporcionan indicios valiosos, se encuentran los accidentes del terreno, la estructura de la red hidrográfica, los manantiales, los lagos y la vegetación.

Es probable que el agua del suelo aparezca en mayor cantidad bajo los valles, que bajo las colinas. Los rellenos del valle contienen los residuos de rocas deslavadas de las laderas de las montañas, a menudo estos rellenos resultan ser capas acuíferas muy productivas. El material pudo haberse depositado por las corrientes o inundaciones junto con algo de material más fino que penetra en los lagos para formar sus lechos estratificados. Algunos de estos depósitos también se pueden haber transportado por el aire y vuelto a depositar como dunas de arena. Todos estos y otros factores influyen sobre el ritmo de producción del relleno del valle, generando el acuífero.

Cualquier indicio del agua superficial, tal como corrientes, arroyos, manantiales, pantanos o lagos, indican la presencia de agua, aunque no necesariamente en cantidad aprovechable.

En regiones áridas donde hay vegetación, se tiene un indicio de la existencia de corrientes o agua subterránea, los alrededores de dicha vegetación, son sitios propicios para la búsqueda de acuíferos.

d) Secciones transversales geológicas.

Las secciones transversales se forman a partir de pozos o perforaciones de exploración, ubicados en una línea imaginaria o trazada para tal efecto. En algunas zonas cuando existen varios pozos donde se explotan las aguas subterráneas, los estudios de estratigrafía de estos, sirven para determinar dichas secciones (cuando no existen los estudios estratigráficos en los pozos se pueden hacer registros con rayos gamma para determinar la estratigrafía).

De acuerdo con estas secciones se pueden encontrar indicios de las características del agua del subsuelo de una localidad, indicando el tipo, espesor y profundidad de las capas acuíferas, así como la sucesión de las formaciones subyacentes y el tipo de material del que están formadas. También indican la existencia de los rasgos de la capa freática o artesiana de las formaciones acuíferas. Las secciones transversales de la figura 2.2 ilustran las características antes mencionadas.

Cuando hay indicios de que en el sitio de estudio se encuentran grandes acuíferos, los cuales se pretenden explorar en forma masiva, se hacen perforaciones para exploración con el fin de determinar las secciones, mientras que, cuando no haya tales indicios o no se requiera la explotación a gran escala de dichos acuíferos será antieconómico realizar las perforaciones para la realización de las secciones.

pero si el objetivo es determinar la profundidad y condiciones de un acuífero dado, la elección del método que convenga es limitado.

Investigar el agua subterránea desde la superficie es difícil, aun en el mejor de los casos y no siempre se obtienen resultados satisfactorios; sin embargo, estos métodos resultan mucho más económicos que las investigaciones directas profundas, las cuales requieren de perforaciones y muestreos cuidadosos. Lógicamente, ninguno de los métodos geofísicos señalados puede dar resultados definitivos por sí mismos, ya que la correcta interpretación de los datos es fundamental y depende de la experiencia del especialista.

a) Prospección gravimétrica.

Involucra la medida de las variaciones que ocurren en uno de los campos de fuerzas naturales de la tierra. El método está basado en la conocida Ley de Newton de que cada partícula en el universo induce una atracción sobre las demás partículas y que esa atracción es proporcional a las masas e inversamente proporcional a la distancia que las separa. Esta expresión se puede escribir:

$$F = \gamma \frac{M_1 M_2}{R^2} \quad (\text{ecuación 2.1})$$

donde:

F = Fuerza de atracción entre dos partículas, en N .

γ = Constante de proporcionalidad, tiene un valor fijo de $6.67 \times 10^{-11} N m^2 Kg^{-2}$.

M_1 = Masa de la partícula 1, en Kg .

M_2 = Masa de la partícula 2, en Kg .

R = Masa de la partícula 1, en m .

La fuerza de gravedad se manifiesta en forma continua sobre la superficie terrestre, y su intensidad en un punto determinado, está afectada no solamente por la materia localizada en su proximidad, sino también por toda la masa terrestre y por el sistema solar.

En las exploraciones gravimétricas, se requiere introducir correcciones por las irregularidades en la distribución de la materia bajo la superficie de la tierra (corrección isostática) y en la superficie de la misma (corrección cartográfica), además de una corrección por mareas terrestres, las cuales dependen de la posición relativa del sol y la luna. Estas correcciones deben hacerse independientemente de las debidas a la variación normal con la latitud, elevación y densidad superficial.

La exploración gravimétrica aprovecha la existencia de contrastes que hay entre la densidad de las masas geológicas y los materiales que les rodean en dirección horizontal. Solo se observan anomalías cuando un material con menor o mayor densidad se eleva o queda encajado dentro de la roca normal de la región; si esto ocurre con un material de igual densidad, no se registra anomalía.

Por lo general los resultados de las exploraciones gravimétricas se presentan en forma de planos de curvas de igual anomalía gravimétrica. El plano final representa la distribución superficial de la gravedad, debida únicamente a las variaciones de densidad en las rocas sepultadas.

Las exploraciones gravimétricas indican grandes tendencias geológicas regionales y delimitan las áreas de anomalías estructurales locales. La extensión y magnitud de las anomalías gravimétricas dependen de numerosos factores, entre los cuales se pueden citar la profundidad, dimensiones, forma y contrastes de densidad que estén involucrados.

A partir de un perfil gravimétrico dado, es posible calcular un número infinito de variedades en forma, profundidad y contraste de densidad que satisfaga los datos observados; por lo tanto, aparentemente solo podrán obtenerse soluciones únicas en la interpretación, cuando se disponga de un acervo considerable de datos adicionales provenientes de mapas sismológicos, muestreo en pozos e información de densidades obtenidas de las muestras. La interpretación cuantitativa es aún más incierta, cuando son tomadas en cuenta las diversas superficies con contraste de densidad que pueden presentarse en una columna geológica. Una interpretación cuantitativa adecuada requiere datos de campo precisos, la remoción del gradiente regional así como otras fuentes de disturbio, además de información adicional que permita limitar la profundidad de donde proviene una anomalía determinada.

Como el método gravimétrico es caro y las diferencias en el contenido de agua de las formaciones geológicas rara vez causan diferencias de densidad identificables en la superficie, su aplicación es muy restringida en los estudios hidrogeológicos. Es posible que puedan identificarse algunas condiciones geológicas especiales, tales como depósitos aluviales potentes alrededor de áreas montañosas, cuerpos intrusivos que puedan constituir fronteras o los acuíferos y, desde luego, obtener la probable morfología de la roca basal.

b) Prospección magnética.

Una exploración magnética consiste en comparar la intensidad del campo magnético entre puntos de observación localizados en la superficie de la tierra. Este campo natural (de fuerza), es el resultante de los campos correspondientes a las anomalías geológicas profundas y al magnetismo terrestre; la variación en la distribución del material magnético bajo la superficie, altera la intensidad del campo magnético en la superficie. Dado que las rocas sedimentarias, por lo general, no son magnéticas, las variaciones observadas en la superficie se atribuyen generalmente al relieve de la roca basal o a variaciones en la distribución de los cuerpos magnéticos.

Este método resulta útil para señalar las tendencias geológicas generales y la posible profundidad del complejo basal, pero, como las variaciones magnéticas rara vez están asociadas con la presencia de agua subterránea, su empleo es muy restringido para esta clase de trabajos. Solamente puede esperarse alguna información indirecta, tal como la posible presencia de diques sepultados, derrames basálticos, etc. A largo plazo se espera mayor información consistente y estadística que permita auxiliar en la localización de acuíferos muy especiales y profundos, cuya explotación hoy en día es antieconómica.

c) Prospección sísmica.

Los métodos sismológicos se asemejan a los empleados en óptica en cuanto a que involucra fenómenos físicos similares, ya que en ambos casos se trabaja con un tipo de energía que se propaga en forma de ondas; tales fenómenos son: velocidad, frecuencia, fase y dirección con sus asociados: tiempo de recorrido, longitud de onda, absorción, reflexión y refracción.

La sismología se basa especialmente en las variaciones, de la elasticidad y densidad que presentan los materiales que componen la corteza terrestre, utilizando para su aplicación ondas elásticas producidas artificialmente, dependiendo por lo tanto de la velocidad de propagación de estas ondas a través de las rocas siendo necesario para su empleo un plano de contacto entre dos materiales de diferentes propiedades elásticas.

De acuerdo con el carácter de las ondas cuyo tiempo de propagación es el que se mide, se han desarrollado dos métodos diferentes: el de refracción y el de reflexión.

Método de refracción. Aprovecha las ondas sísmicas que se refractan en las capas del subsuelo, identificando su arribo a la superficie mediante geófonos detectores colocados lejos del punto de tiro. Con la información obtenida en los sismogramas, se construyen gráficas que ligan los tiempos con las distancias, y, a partir de estos el geofísico debe deducir la estratificación, aplicando algunos de los métodos de interpretación existentes, que si bien solo son aproximados, en la práctica resultan satisfactorios.

Este método tiene la limitación de no identificar estructuras profundas, sin embargo para algunos aspectos hidrogeológicos es más útil, ya que permite ubicar mejor la profundidad del nivel freático.

Método de reflexión. Se utiliza más frecuentemente en la industria petrolera, la energía sísmica que se ha reflejado en las formaciones profundas, se registra en la superficie mediante una serie de geófonos colocados en línea, cerca del punto en que se origina la energía. El tiempo que emplea la onda en recorrer la distancia hasta el reflector y volver a la superficie en el punto de tiro, es el tiempo de reflexión y la sucesión de impulsos recogidos por cada detector, constituye un reflejo y su registro se denomina sismograma.

El método de reflexión proporciona datos más precisos independientemente de la profundidad, sin embargo, tiene un inconveniente de que no puede obtenerse información cercana a la superficie.

En el sismograma quedan anotados los tiempos de reflexión y cuando se conoce la velocidad con que se propagan las ondas en el medio, resulta fácil calcular las profundidades de la superficie reflectora. Repitiéndose la operación en diversos puntos a lo largo de una línea, con detectores colocados en ambos lados del punto de tiro, se obtienen reflejos procedentes de porciones contiguas de la superficie reflectora y así se puede obtener un perfil continuo.

En la práctica, la interpretación dista de ser sencilla, debido a que existen diversos factores que la dificultan. La superficie no es un plano horizontal en la mayoría de los casos; las velocidades de transmisión de las ondas no son constantes, las estructuras

sepultadas distan mucho de corresponder a una estratificación horizontal, sin embargo, un geofísico experimentado, puede deducir las condiciones estructurales profundas en un área mediante el cálculo de profundidades y las inclinaciones con respecto a la horizontal de las formaciones.

Se debe advertir que la prospección sísmológica solo se justifica, de una manera económica, para el estudio de grandes acuíferos que se contemple explotar de una manera masiva.

d) Sondeos geoelectricos.

Las estructuras geológicas son delineadas mediante la interpretación de sus reacciones con los campos eléctricos y electromagnéticos; sin embargo, lo limitado del poder de penetración de los sondeos, restringe su aplicación a aquellos accidentes estructurales comprendidos dentro de profundidades aproximadas de 1500 metros.

Una de las aplicaciones de los sondeos geoelectricos es el de relaciones de caída de potencial; este método se basa en la propagación de una corriente eléctrica de muy baja frecuencia y en las características físicas del subsuelo, con esto se crea un campo de potencial en el subsuelo al introducir al terreno una corriente de intensidad generada y recuperar los efectos que se producen mediante la utilización de instrumentos y dispositivos de medida, permitiendo obtener información sobre las características generales del subsuelo y definir la posición de las anomalías de acuerdo con las propiedades eléctricas que presenta. De esta forma es posible definir estructuras que tienen no solamente disposiciones horizontales sino hasta verticales como fallas, filones o diques.

En la mayoría de los casos los materiales del subsuelo permiten en mayor o menor grado el flujo de corriente eléctrica, ya sea a través de las rocas o minerales debido a la ionización de los mismos o de los electrolitos que se forman por la presencia del agua (conductibilidad eléctrica).

De acuerdo con lo anterior las rocas compactas, presentarán una elevada resistencia al paso de flujo de la corriente; mientras que si son permeables opondrán baja resistencia, la que disminuirá aún más si contienen agua.

En las formaciones porosas, la resistividad esta gobernada en mayor proporción por el contenido y calidad del agua de la formación, que por la resistividad de la roca; por lo tanto en los acuíferos compuestos por materiales no consolidados, son el agua y su contenido de sales las que gobiernan su resistividad; de este hecho deriva la utilidad del método para los estudios geohidrológicos.

Los sondeos geoelectricos consisten en formar un campo eléctrico artificial en el subsuelo generándolo desde la superficie del terreno mediante el contacto de planchas metálicas llamadas electrodos de corriente y obtener potenciales inducidos a través del contacto de los electrodos con la profundidad teórica de la exploración con los puntos de contacto de la fuente de corriente y la distancia a los de captación del campo eléctrico (electrodos de potencial), permitiendo el calculo y trazo de graficas que sirven para determinar las zonas de saturación y la profundidad a la que estas se registran, mas no datos precisos sobre la potencialidad de los acuíferos.

El método de relaciones de caídas de potencial se aplica entre otros sondeos geoelectrónicos; que tiene como finalidad la localización de zonas mineralizadas, fallas, fracturas, diques, etc., para el presente trabajo, la localización de agua subterránea.

Los sondeos geoelectrónicos se basan en la resistividad de las formaciones geológicas al aplicarles un potencial eléctrico. La resistividad se define como la resistencia en ohm que existe entre las caras opuestas de un cubo unitario del material, esto es:

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (\text{ecuación 2.2})$$

donde:

ρ = Resistividad, en *ohm-m*.

R = Resistencia del material, en *ohm*.

A = Área de la sección recta del cubo unitario, en m^2 .

L = Longitud del cubo unitario, en *m*.

En el sistema métrico, las unidades de resistividad son: ohm-m. En la siguiente tabla, se dan valores de la resistividad de algunos materiales.

MATERIAL	RESISTIVIDAD (ohm-m)
Grafito	3×10^{-4}
Pirita	10^{-3}
Salmuera	5×10^{-2}
Arcilla	1.0
Yeso	10.0
Agua dulce	50.0
Serpentina	3×10^2
Caliza	10^3
Granito	10^6
Cuarzo	10^{11}
Calcita	5×10^{12}

TABLA No. 2.1 RESISTIVIDAD DE ALGUNOS MATERIALES.

Las resistividades reales se determinan a partir de las aparentes, las cuales se calculan por la medición de la corriente y del potencial entre pares de electrodos colocados en la superficie.

Existen dos métodos principales para conocer el campo eléctrico creado. El de Wenner y el de Schlumberger.

Método Wenner. Es el más usual, en este los cuatro electrodos quedan igualmente espaciados con intervalos a a lo largo de una línea recta como se aprecia en la figura 2.3. Para este arreglo en particular, la resistividad aparente del terreno se puede calcular con la siguiente formula:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (\text{ecuación 2.3})$$

donde:

ρ_a = Resistividad aparente, en *ohm-m*.

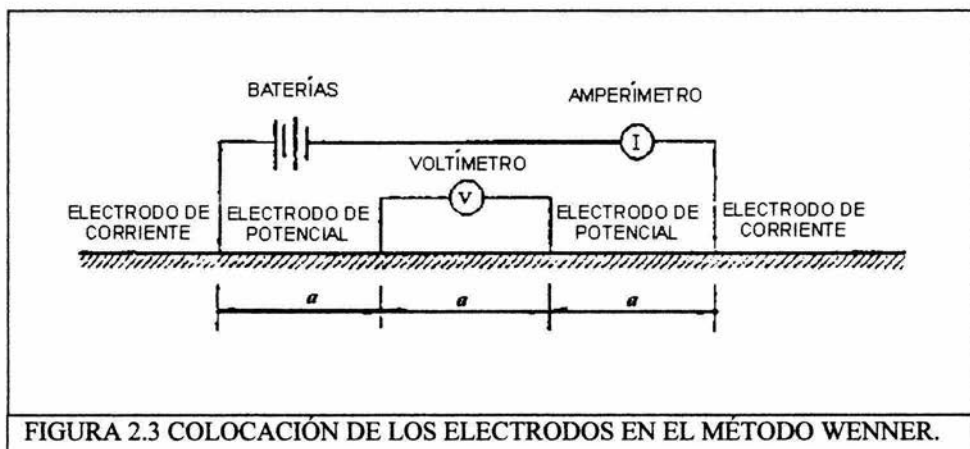
a = Distancia entre los electrodos, en *m*.

V = Diferencia de potencial medida en los electrodos internos, en *voltios*.

I = Intensidad de la corriente, en *amperes*.

2π = Valor constante para obtener la resistividad aparente, en *ohm-m*.

La resistividad aparente obtenida corresponde a un volumen de terreno que depende del espaciamiento de los electrodos; a mayor separación de electrodos corresponde una penetración más profunda, es decir, la profundidad de penetración es aproximadamente igual al espaciamiento en este sistema. Por lo tanto a medida que se van separando los electrodos se obtienen resistividades aparentes de estratos más profundos, si se grafican las resistividades obtenidas en función de la separación de los electrodos se obtendrán valores diferentes a medida que la corriente alcanza mantos con distintas resistividades. Hay que advertir que los cambios de resistividad a grandes profundidades producen un efecto pequeño en la resistividad aparente, si se le compara con el que produce los cambios de resistividad a profundidades someras; por lo tanto el método no es recomendable para determinar resistividades a profundidades mayores de 300 metros.



Método Schlumberger. se basa en la localización de las líneas equipotenciales, las trayectorias de estas se identifican mediante tanteos hechos en el terreno para

localizar los puntos de igual potencial, para esto se utilizan cuatro electrodos como se aprecia en la figura 2.4, donde la resistividad aparente se determina mediante la expresión:

$$\rho_a = \pi \frac{(L/2)^2 - (b/2)^2}{b} \frac{V}{I} \quad (\text{ecuación 2.4})$$

donde:

ρ_a = Resistividad aparente, en *ohm-m*.

L = Distancia entre los electrodos de corriente, en *m*.

b = Distancia entre los electrodos de potencial, en *m*.

V = Diferencia de potencial medida en los electrodos internos, en *voltios*.

I = Intensidad de la corriente, en *amperes*.

π = Valor constante para obtener la resistividad aparente, en *ohm-m*.

Teóricamente se debe verificar que $L \gg b$ pero para fines prácticos basta que $L \geq 5b$. Este método sirve para el estudio de límites horizontales, tales como el nivel freático o la superficie de rocas estratificadas.

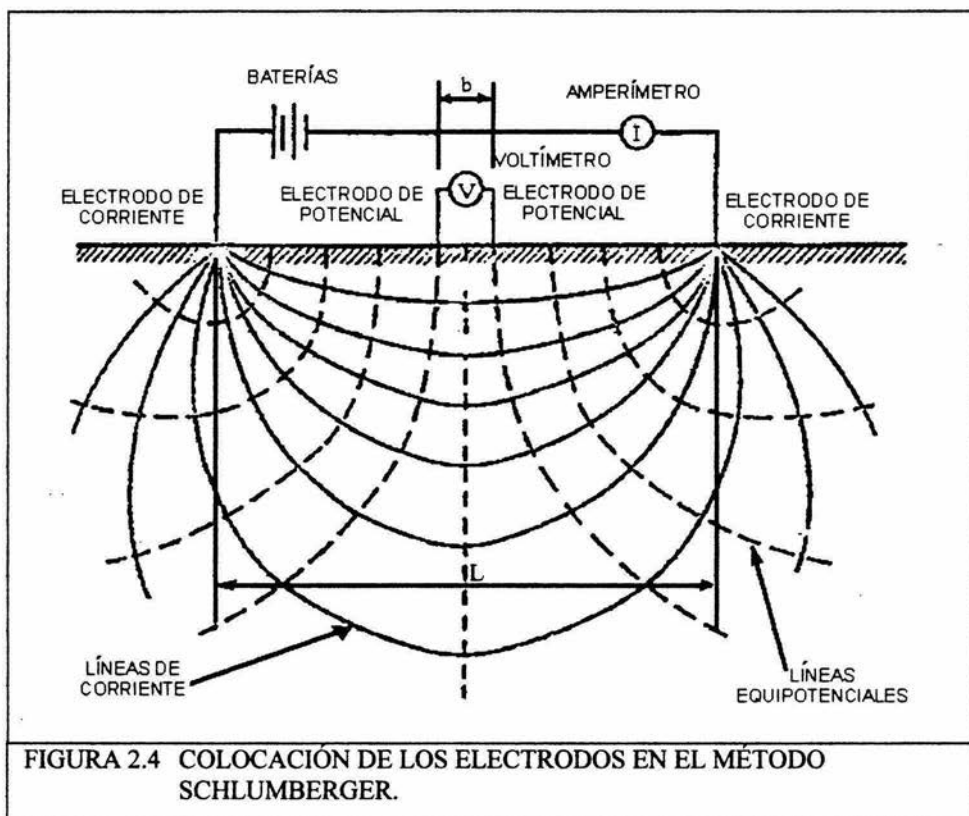


FIGURA 2.4 COLOCACIÓN DE LOS ELECTRODOS EN EL MÉTODO SCHLUMBERGER.

De todos los métodos geofísicos, el de resistividad eléctrica es el más efectivo y económico para investigar el agua subterránea; lo portátil de su equipo y lo fácil de manejar, permite obtener datos rápidamente y a un costo razonable. Sin embargo las limitaciones que se deben considerar al emplear el método de las resistividades son: la localización en el área de estudio de tuberías metálicas, cables y líneas de transmisión de alto voltaje, cercas con postes de metal, etc., ya que producen perturbaciones que influyen en las lecturas.

En el capítulo VI, en la figura 6.1, se aprecia la gráfica de un sondeo geoelectrico real y posteriormente su interpretación.

2.3 REGISTROS REALIZADOS EN PERFORACIONES DE EXPLORACIÓN.

Los métodos de exploración superficial proporcionan información respecto a las características geológicas generales en una zona y a la posible existencia de estructuras favorables para la presencia de agua subterránea; sin embargo para localizar con mayor certeza las formaciones que contengan agua, así como para determinar la calidad de ésta, se recurre a medidas directas en perforaciones y pozos de la zona donde se pretenda construir un pozo profundo. Dependiendo de la existencia de perforaciones o pozos, se realizan registros eléctricos y registros de rayos gamma.

a) Registros eléctricos en perforaciones de exploración o pozos con ademe no metálico.

Al efectuar un registro eléctrico en una perforación se miden dos propiedades eléctricas, que son: las resistividades de las formaciones y el potencial natural.

La resistividad de un material es la propiedad que lo caracteriza por su oposición al paso de una corriente eléctrica, o sea, es la recíproca de la conductividad eléctrica.

La resistividad esta vinculada con la naturaleza, cantidad y distribución del agua en una formación geológica. Como estos factores varían apreciablemente de una formación a otra, las determinaciones de la resistividad hechas en una perforación, pueden utilizarse para definir los contactos entre las diversas formaciones geológicas y obtener información respecto a las capas atravesadas con la perforación y la presencia de sales, ya que éstas son muy buenas conductoras.

Cuando el equipo es de un solo electrodo, los valores registrados para la resistividad corresponden a promedios de una esfera con un diámetro aproximado de un metro; cuando el equipo es de varios electrodos, los valores corresponden al promedio de varios metros cúbicos de formación y lodo de perforación (esto cuando el registro se hace en una perforación de exploración). Cuando existe lodo de perforación la medición de su resistividad difiere del de las formaciones, por lo tanto su presencia afecta a la lectura de la resistividad de las formaciones, de este modo cuanto mayor sea el diámetro de las perforaciones afectara en mayor cantidad las lecturas.

Se debe tener en cuenta que cuando los acuíferos son delgados y están confinados entre formaciones arcillosas, la medida de su resistividad queda influenciada por la de las arcillas; como estas últimas son de baja resistividad, el registro acusa baja resistividad también para el acuífero.

En cuanto al potencial natural se ha demostrado la presencia de potenciales eléctricos naturales entre formaciones geológicas, mediante determinaciones hechas en multitud de pozos perforados. Estos llamados "potenciales espontáneos" varían de acuerdo con la naturaleza de los estratos o mantos atravesados. La medida de un potencial se hace entre un electrodo dentro de un pozo y un electrodo fijo en la superficie, registrándolo en función de su profundidad.

Partiendo de una curva de potenciales, es posible determinar los límites de las formaciones y obtener datos respecto a la naturaleza de algunos de los estratos. El potencial de la arcilla se considera como referencia; por ejemplo cuando se dice que un acuífero tiene potencial negativo, significa que tiene un valor negativo mayor que el potencial de la arcilla que lo rodea. De este modo el potencial de una formación que contenga agua salada es generalmente negativo con respecto al potencial de las arcillas o lutitas, en formaciones que contengan agua dulce, los potenciales pueden ser positivos o negativos con respecto al potencial de las arcillas y normalmente son de menor amplitud que en las formaciones que contienen agua salada.

El efecto originado por las arcillas y por el lodo sobre el potencial eléctrico de un acuífero poco productivo, es básicamente el mismo que el efecto que tiene sobre la resistividad del acuífero; cuanto mayor sea el diámetro del pozo y más delgado el espesor del acuífero, la diferencia de potencial entre el acuífero y la arcilla circundante será más pequeña.

La combinación de las curvas de potencial y de resistividad, colocadas paralelamente, constituyen el registro eléctrico. Tales graficas son sumamente valiosas para la localización de formaciones que contengan agua dulce, también para estudios geológicos, debido a que permiten efectuar la correlación entre los diversos mantos en perforaciones correspondientes a una misma zona. El registro eléctrico debe obtenerse en perforaciones sin ademe metálico, ya que el acero del ademe constituye de hecho una coraza para la corriente eléctrica.

b) Registros con rayos gamma en perforaciones.

El registro de rayos gamma es una medida relativa de la radiactividad natural de los estratos de la tierra, ya que existen diminutas cantidades de materiales radiactivos, universalmente distribuidos. Se han registrado cantidades que se pueden medir en toda clase de rocas: la lignita y el carbón tienen muy poca radiactividad; la lutita y las arcillas bentoníticas y orgánicas, son las que mayor radiactividad presentan; mientras que los acuíferos, las arenas y las calizas tienen una radiactividad baja.

Un registro de rayos gamma, debe interpretarse en términos geológicos y de estratigrafía para que sea útil; dado que la comprensión adecuada de un registro de rayos gamma identifica las diferentes formaciones representadas en el registro, tal interpretación involucra necesariamente una gran variedad de condiciones, tanto geológicas como de perforación. El hecho de que estos factores varíen ampliamente de perforación en perforación y de zona en zona, se requiere de cierta experiencia, para efectuar una interpretación correcta; por lo tanto se requiere de un buen conocimiento de la estratigrafía local para la correcta interpretación geológica de un registro de rayos gamma.

Una ventaja del registro de rayos gamma sobre otro tipo de registros, es su posibilidad de captar información a través del ademe de acero en los pozos; esto permite un estudio estratigráfico de los pozos antiguos, constituidos con anterioridad al desarrollo de los métodos de registro geofísicos que actualmente se utilizan.

Desde el punto de vista geohidrológico, la utilidad de los registros de rayos gamma reside en la posibilidad de definir las fronteras entre los diversos estratos, sin tener que hacer correcciones por la mayor o menor salinidad en el lodo de perforación. Normalmente se utilizan para cotejar los resultados obtenidos con los registros eléctricos y así poder lograr una interpretación más correcta.

2.4 PERFORACIONES PARA EXPLORACIÓN.

Como complemento de los estudios geohidrológicos son recomendables las exploraciones con equipos denominados "perforaciones de exploración o diamante". Los hay de tres tipos: percusión, rotación y combinados. Con los primeros se logran diámetros de ± 50.8 mm (2") y las profundidades que se alcanzan son del orden de 80 metros. Con los equipos de rotación, se perfora a más de 500 metros, en diámetros que varían de ± 57.15 mm (2 1/4") a ± 1140.3 mm (4 1/2") y las combinadas, cuyo avance es más rápido, tienen limitaciones en sus profundidades (alrededor de 120 metros) y diámetros de perforaciones no mayores de ± 101.6 mm (4").

Para fines exploratorios es necesario que el diámetro de la perforación permita la introducción del electrodo del aparato del registro eléctrico, deben emplearse equipos rotatorios usando lodos como fluidos de perforación.

Para los estudios previos geohidrológicos las localizaciones son fijadas por el geohidrólogo y las profundidades por los sondeos geofísicos. Dependiendo de la correlación de los sondeos, muestras y registros eléctricos, se procede a ampliar la exploración o desecharla si resulta negativa.

Los equipos de percusión, constan esencialmente de un tripie de fierro tubular que pende de una polea a través de la cual, un malacate accionado por un motor de gasolina que impulsa un cable de acero a cuyo extremo se fija la sarta de perforación. La sarta esta formada por una zapata cortada a la que se acoplan tubos huecos denominados varillas. El muestreo se efectúa a través del interior del varillaje golpeando con el martinete sobre la cabeza golpeadora. Cuando las formaciones atravesadas son aluviones quebradizos (que se deshacen fácilmente), es necesario ademar la longitud perforada y los registros eléctricos deben correrse con equipos de rayos gamma.

Los equipos rotatorios existen en el mercado en diferentes capacidades, se componen de una cabeza rotatoria, accionada mecánicamente o hidráulicamente; un malacate de maniobras, una cabeza de gato, una unidad de potencia de tipo automotriz a gasolina o diesel, con transmisión de cuatro velocidades principales, misma que puede ser reforzada por un sistema "dual"; una bomba de desplazamiento positivo, condicionada a volumen o presión. Además varillas de perforación, barriles muestreadores, tubería de ademe, zapatas cortadoras y brocas de los tipos: tricónico, de diamante, con refuerzos de carburo de tungsteno, rimas, etc.

Estos equipos pueden perforar con brocas de diamante como herramientas de corte pudiendo utilizar también barrenas de roles o martillos neumáticos empleando lodos, espumantes, productos químicos o aire como fluidos de perforación. Cuando se emplea la broca de diamante, para la recuperación de muestras se utiliza por su rapidez barras de perforación de pared paralela y con diámetro interior suficiente para permitir el paso del tubo muestreador, desde el fondo del barreno hasta la superficie, extrayéndolo por medio de un pescador y un cable de acero operado desde la superficie por un malacate, sin necesidad de extraer toda la sarta en cada toma. Para evitar el desgaste excesivo o la ruptura de los diamantes, que repercute en el costo de los trabajos, la máquina debe montarse sobre patines, anclándola durante la operación y no sobre un camión, por la inestabilidad que este presenta.

Cualquiera de estos dos sistemas permite la recuperación de muestras inalteradas; no así el sistema combinado o neumático en el que es necesario utilizar aire para la recuperación de las mismas, obteniéndose estas, fracturadas. Este sistema proporciona buenos resultados en materiales compactos y secos no así en los de tipo cavernoso o quebradizo en los que el avance es lento y a veces nulo.

La exploración directa profunda o en rocas sueltas y fracturadas, se practican con las máquinas formales de pozos profundos, iniciándose con una perforación piloto de diámetro entre 101.6 mm (4") y 152.4 mm (6"), que es ampliada posteriormente, si se encuentran acuíferos; en cuya localización y ubicación se emplean los aparatos para registros eléctricos, cuyos electrodos, se hacen descender a todo lo profundo de la perforación. El registro eléctrico permite adicionalmente, juzgar respecto a la salinidad del agua que cruce la perforación.

III. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE POZOS.

Los pozos para la explotación de aguas subterráneas se deben diseñar para obtener la mayor productividad, esto asociado con el máximo gasto específico; para reducir al mínimo los costos de construcción, operación y mantenimiento, así como la selección de los materiales que garanticen la vida económica del pozo y la dimensión de sus elementos estructurales.

El diseño y la construcción de un pozo profundo deben ir de forma intercalada, ya que los datos obtenidos durante la perforación; entre ellos el registro eléctrico y la granulometría de las formaciones perforadas; son los parámetros que sirven para la elección de la tubería productora, la necesidad de colocar contra-ademe, realizar la cementación y el diseño del filtro.

La construcción de un pozo comprende las etapas de: perforación (donde se incluye la selección del equipo de perforación más adecuado, el uso de los fluidos de perforación y la corrida del registro eléctrico), colocación del ademado, contra-ademado, cementación y colocación del filtro.

3.1 DISEÑO DE POZOS.

Dentro del diseño de pozos se identifican los parámetros que afectan la profundidad, el diámetro, la elección de la tubería de ademe, contra-ademe, el diseño del filtro y la verticalidad del pozo.

La profundidad del pozo está regida por los siguientes factores:

- 1) De acuerdo al espesor y los niveles del acuífero o acuíferos que se vayan a explotar, debido a que el pozo se profundizará, hasta que garantice un gasto específico y el mayor abatimiento disponible, que permita incrementar la producción.
- 2) Depende de la profundidad a que se encuentre el acuífero más profundo por explotar, en caso de que existan estratos vacíos o impermeables.
- 3) De la calidad del agua, factor que en ocasiones limita la profundidad y en otras la propicia. Así como el caudal deseado, si técnicamente se pronostica un acuífero productivo, explotable económicamente.

La profundidad de la perforación se obtiene con el resultado del sondeo geoelectrónico, ya que con las resistividades obtenidas, se tendrá una idea de que clase de materiales se encuentran; su densidad, porosidad, forma y tamaño de los intersticios, contenido de sales, calidad de agua, por lo que se conocerán cuáles son las formaciones geológicas perforadas en el sondeo. En las formaciones, la resistividad está gobernada en mayor proporción por el contenido y calidad del agua de la formación, que por la resistividad de la roca; por lo tanto en los acuíferos compuestos por materiales no consolidados, es el agua y su contenido de sales las que gobiernan su resistividad.

El diámetro de la perforación depende de la tubería de ademe y de la existencia de un filtro artificial, mientras que el diámetro del ademe queda definido fundamentalmente por el gasto que se va a explotar, ya que de este depende el diámetro de los tazones de la bomba. Generalmente el ademe ciego forma la cámara de bombeo, al cual se le asigna

un diámetro, que como mínimo será 76.2 mm (3"), mayor que el diámetro de los tazones de la bomba.

El diámetro de los tazones y del ademe, se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$D_t = \sqrt[3]{Q} + 1 \quad (\text{ecuación 3.1});$$

$$D_A = D_t + 3 \quad (\text{ecuación 3.2})$$

donde:

D_t = Diámetro de los tazones, en *pulgadas*.

Q = Caudal esperado, en *litros por segundo*.

1 = Valor constante para obtener el diámetro de los tazones, en *pulgadas*.

D_A = Diámetro de ademe, en *pulgadas*.

En casos especiales, el diámetro de la cámara será de 2" mayor que el del exterior de los tazones. En la ecuación 3.2 se sustituye el 3" por 2".

Considerando la fórmula anterior, se satisfacen los siguientes requisitos:

- 1) La bomba turbina, ya sea o no con motor sumergible, se debe alojar holgadamente en la cámara de bombeo.
- 2) Una adecuada eficiencia hidráulica.
- 3) Se absorben pequeñas desviaciones y torceduras de la cámara, con lo que la columna de la bomba queda sensiblemente vertical.

Tanto las tuberías ciegas como las ranuradas o de cedazo, quedarán sujetas a las presiones naturales del terreno, así como a la acción dinámica producida por el bombeo del pozo, razón por la cuál las tuberías deberán ser de resistencia suficiente para garantizar larga vida a la estructura.

Para normar un criterio respecto al espesor de las tuberías lisas de acero grado "B" que se deban emplear como ademes en pozos, se adoptan las recomendaciones del American Petroleum Institute, el cuál a partir de métodos teóricos y experimentales, proporcionan información referente a los espesores que conviene utilizar para el caso de alumbamiento de aguas subterráneas recomendando la siguiente fórmula para el aplastamiento:

$$H = \frac{28.64 \times 10^6}{D_t \left(\frac{D_t}{t} - 1 \right)^2} \quad (\text{ecuación 3.3})$$

donde:

H = Profundidad límite del ademe, en *m*.

D = Diámetro exterior del ademe, en *cm*.

t = Espesor de la lámina de acero, en *cm*.

28.64×10^6 = Valor constante para obtener la profundidad límite, en *m*.

Cuando se tengan problemas derivados de la activa corrosión electrolítica (fenómenos apreciables de corrosión), los espesores obtenidos mediante la fórmula se incrementan en 6.35 mm (¼"), de acuerdo con la Ex-secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (S.A.R.H.), o se utilizará una aleación adecuada al tipo de problema.

Dentro de la práctica, los diámetros y espesores de los ademes (tubo ciego y cedazo) se tienen que ajustar a los existentes en el mercado, ya que dependiendo de las normas de resistencia mecánica, la profundidad, la corrosión e incrustación del agua; se seleccionan los espesores y materiales adecuados para cada caso.

Las aberturas de los tubos de cedazo dependerán de las partículas finas que se encuentren en él o los estratos atravesados durante la perforación (estratos arcillosos, limosos o arenosos), ya que si estas partículas no son retenidas pueden colapsar a la estructura, ya sea desgastando a la bomba por abrasión durante el funcionamiento de la misma o llenando la tubería de cedazo, provocando en ambos casos la disminución del gasto que se debe obtener, esto se controla por medio de filtros artificiales, llamados de protección, para evitar el paso de los finos hacia el interior del cedazo.

A lo largo de los trabajos realizados, la experiencia ha enseñado que un material granular satisface los requisitos necesarios y suficientes para ser usado como filtro de protección: Si el 15% de su tamaño (D15) es cuando menos cinco veces tan grande como las partículas mayores de la formación a proteger que esté en contacto con el filtro, y no más de cuatro veces mayor que el 85% de la graduación (D85) de las partículas más finas de la formación.

Es necesario reducir al mínimo las pérdidas de carga hidráulica, derivadas del flujo de agua a través del filtro; ésta limitación queda comprendida en la relación granulométrica señalada en el párrafo anterior, la cuál debe considerar lo siguiente:

$$\frac{D_{15} \text{ (de filtro)}}{D_{85} \text{ (formación)}} > 4 \text{ a } 5 < \frac{D_{15} \text{ (de filtro)}}{D_{15} \text{ (formación)}}$$

Como la velocidad de flujo es laminar, la ley de Darcy indica que el gradiente es inversamente proporcional a la permeabilidad y, debido a que esta es proporcional al 15% (D15), la segunda condición de la relación anterior, indica que las fuerzas del flujo por la unidad del filtro son del orden 1/16 a 1/25 de la formación.

Sin embargo debido a las condiciones y a los lugares apartados donde se realizan las perforaciones y al corto tiempo en que se deben realizar dichos trabajos; por experiencia de la S.A.R.H. se propone la siguiente recomendación:

Cualquier clase de materiales, se pueden controlar con un filtro constituido por grava graduada con partículas entre ¼" y ½" de diámetro; para bancos con granulometría uniforme se podrán utilizar partículas entre ¾" y 3/16"; cuando en los bancos de agregados predominan los tamaños grandes, el filtro quedará compuesto por el 40% de materiales que pasen por la criba de ¾" y sean retenidos en la de 3/8" y el 60% del material que pase por la criba 3/8" y sea retenida en la 3/16"; las partículas mencionadas en el párrafo anterior deberán revolverse para que su distribución sea uniforme.

Siguiendo la regla anterior no se han obtenido fracasos derivados del filtro. La granulometría del filtro debe ser proporcionada para determinar las aberturas de las ranuras de los cedazos.

Cualquiera que sea la formación, se elige el cedazo correspondiente y se coloca un adecuado filtro de grava.

Otro parámetro de gran importancia es el registro de verticalidad del pozo y en casos aún más graves el cambio en su dirección, ya que esto provoca que haya contacto entre la bomba y el ademe, que puede favorecer la corrosión de alguno de los dos o de ambos, además del desgaste originado por la vibración que pudiera ocasionar la bomba.

En la construcción de pozos profundos, perforados con máquinas rotatorias, se toman lecturas con inclinómetros que se corren por el interior de la tubería de perforación y reportan el ángulo que se tiene en el punto medido, pero esta técnica requiere de un equipo sofisticado y caro, por lo cual no resulta práctico.

El método más usado para medir la verticalidad de un pozo ya terminado se basa en el principio de los triángulos semejantes como se muestra en la figura 3.1.

La desviación se calcula con la siguiente fórmula:

$$D = (h + p) \left(\frac{d}{10h} \right) \quad (\text{ecuación 3.4})$$

donde:

h = altura del eje de la polea de donde cuelga la sonda con respecto a la platina, en m .

d = desviación leída en la platina, en mm .

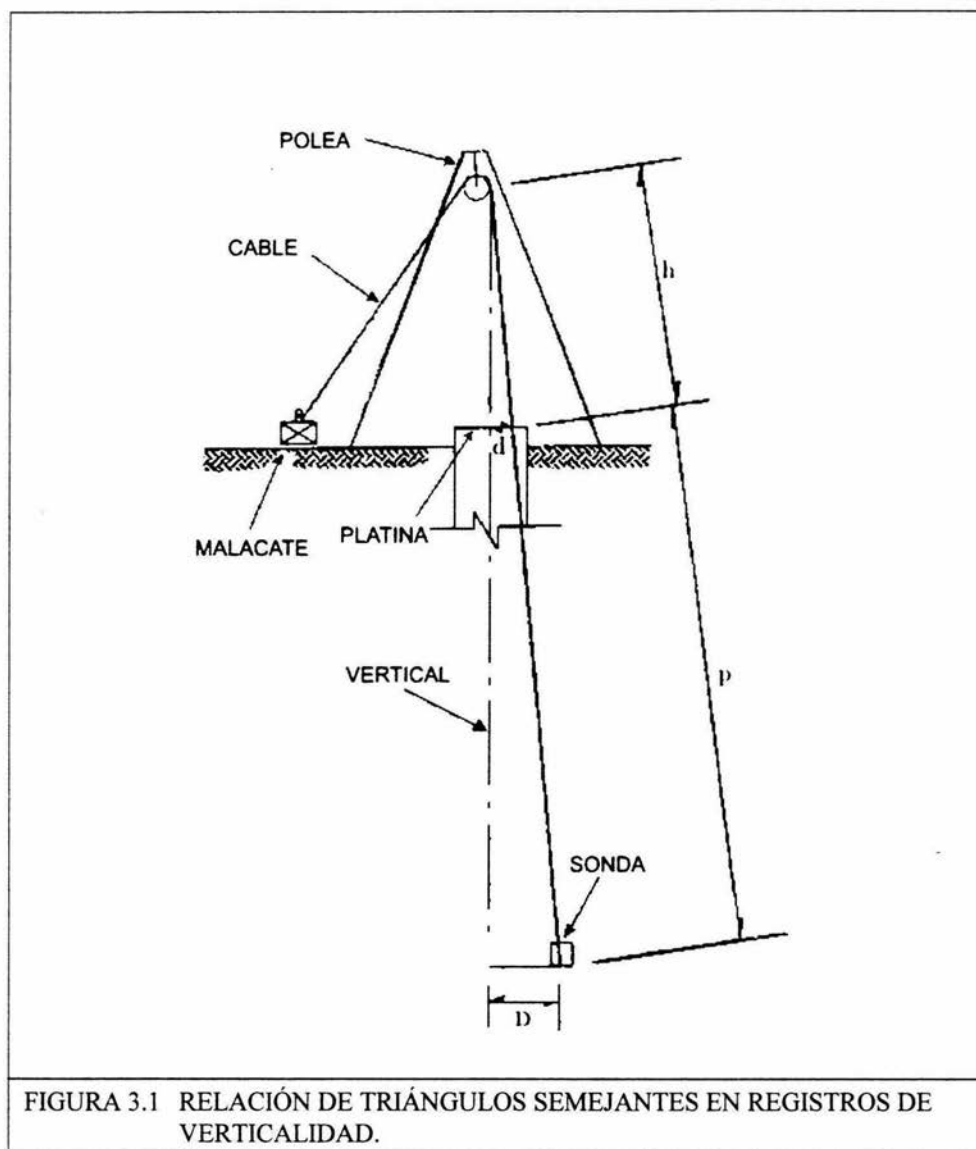
p = profundidad de la sonda respecto a la platina, en m .

D = desviación real, en cm .

En la práctica las lecturas generalmente se toman con intervalos de 3 metros.

Es importante conocer los límites de la desviación permitida de un pozo, a continuación se indican las normas utilizadas en nuestro país:

- 1.- La norma de la Dirección de Agua Potable y Alcantarillado del D. D. F., para la cámara de bombeo permite desviaciones de hasta un diámetro del ademe en cada 100 metros.
- 2.- La norma de la Dirección de Geohidrología y Zonas Áridas de la Ex-secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, permite desviaciones en la cámara de bombeo de hasta 2/3 del diámetro del ademe por cada 30 metros de profundidad, pero siempre y cuando no rebase 0.5° cada 100 metros de profundidad del pozo.
- 3.- La norma Europea, permite en la cámara de bombeo de 0.5° en cada 50 metros y en la porción filtrante de 1.0° en cada 50 metros.



3.2 PROCEDIMIENTO DE PERFORACIÓN.

Durante el proceso de perforación se tienen dos etapas: la selección del equipo de perforación y el programa de perforación, el cual incluye: el uso de los fluidos que se utilizan (lodos, agua, aire con espumante, etc.), la corrida del registro eléctrico y la recolección de los residuos de las formaciones perforadas; con los datos anteriormente mencionados se hace el diseño de la tubería productora y el filtro.

3.2.a Selección del equipo de perforación.

Para definir el equipo a emplear, se deben conocer los diferentes equipos de perforación: percusión tipo pulseta, rotatorio y neumático.

a) Equipo de percusión tipo pulseta.

Este equipo está compuesto por: la unidad motriz que consiste en un motor de combustión interna, de gasolina o diesel; un malacate en el cual se enrolla el cable para operar la sarta de perforación; un segundo malacate el cual lleva el cable de cuchareo; un tercer malacate para manejar el cable con que se izan e instalan las tuberías de ademe y una viga tipo balancín, que por medio de un mecanismo tipo pitman imparte a la sarta de perforación un movimiento recíprocante con el que se realiza la perforación. Todos estos mecanismos vienen montados sobre un bastidor o chasis de camión, formado por perfiles de acero soldados para formar una armadura rígida, la cual viene equipada con un mástil generalmente de tipo telescópico, este mástil está compuesto de dos secciones fácilmente izables que descansan sobre la máquina al ser transportada. La máquina se opera a través de controles localizados generalmente en la parte posterior derecha de la unidad y para su transporte rápido puede montarse sobre una estructura de camión o trailer, como se muestra en la figura 3.2.

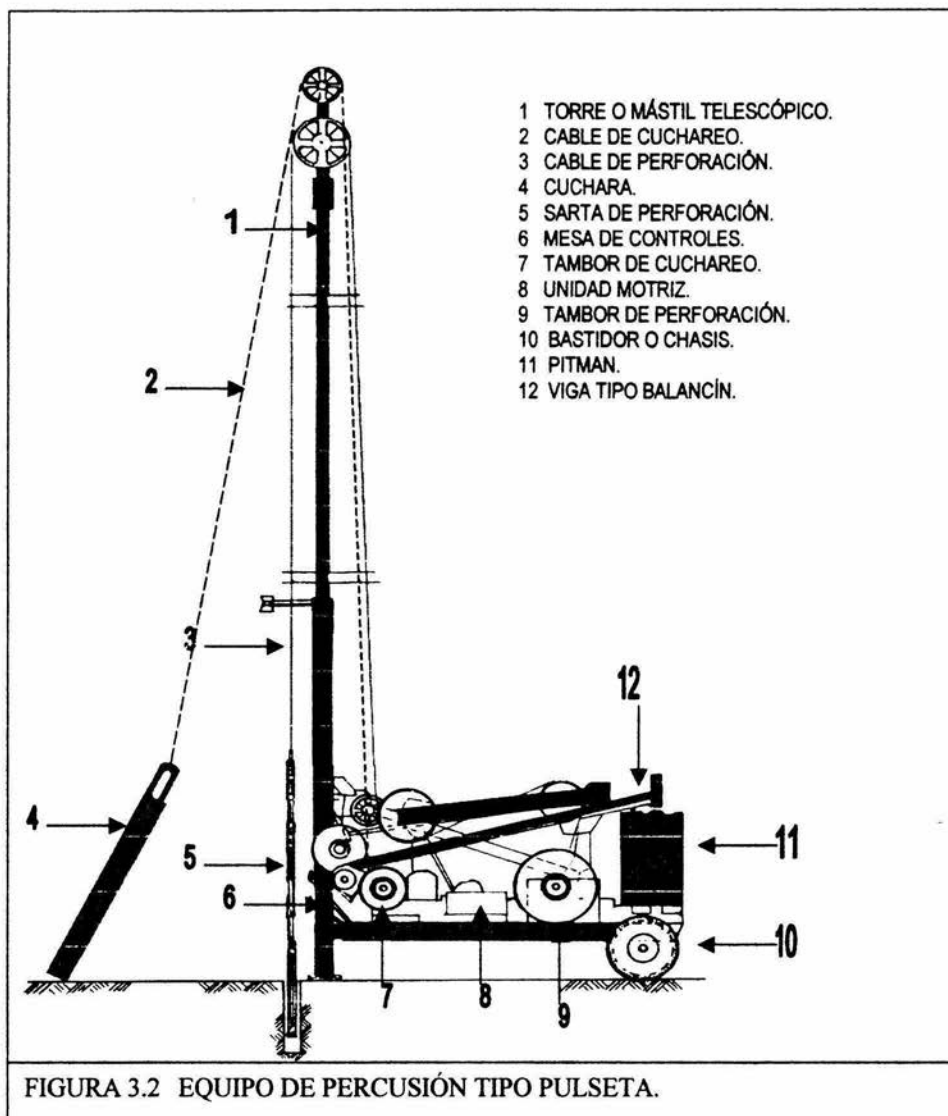
Las herramientas que utiliza este equipo son: la sarta de perforación, herramientas para el cuchareo, las herramientas de pesca y en ocasiones una tarima de operaciones.

Sarta de perforación. Está constituida por: un protector de cable, portacable o cabezal giratorio, tijeras de perforación, vástago percusor, barrena o barretón y las juntas conectoras que sirven de unión entre las piezas anteriormente mencionadas (aunque son partes de las mismas), como puede observarse en la figura 3.3.

1.- *Protector de cable.* Es una herramienta complementaria, su forma se ajusta al cuello del portacable y tiene una sección de un cuarto de círculo por donde se desplaza el cable, tiene por objeto evitar que el cable se troce, cuando las herramientas se levantan desde la posición horizontal hasta la vertical.

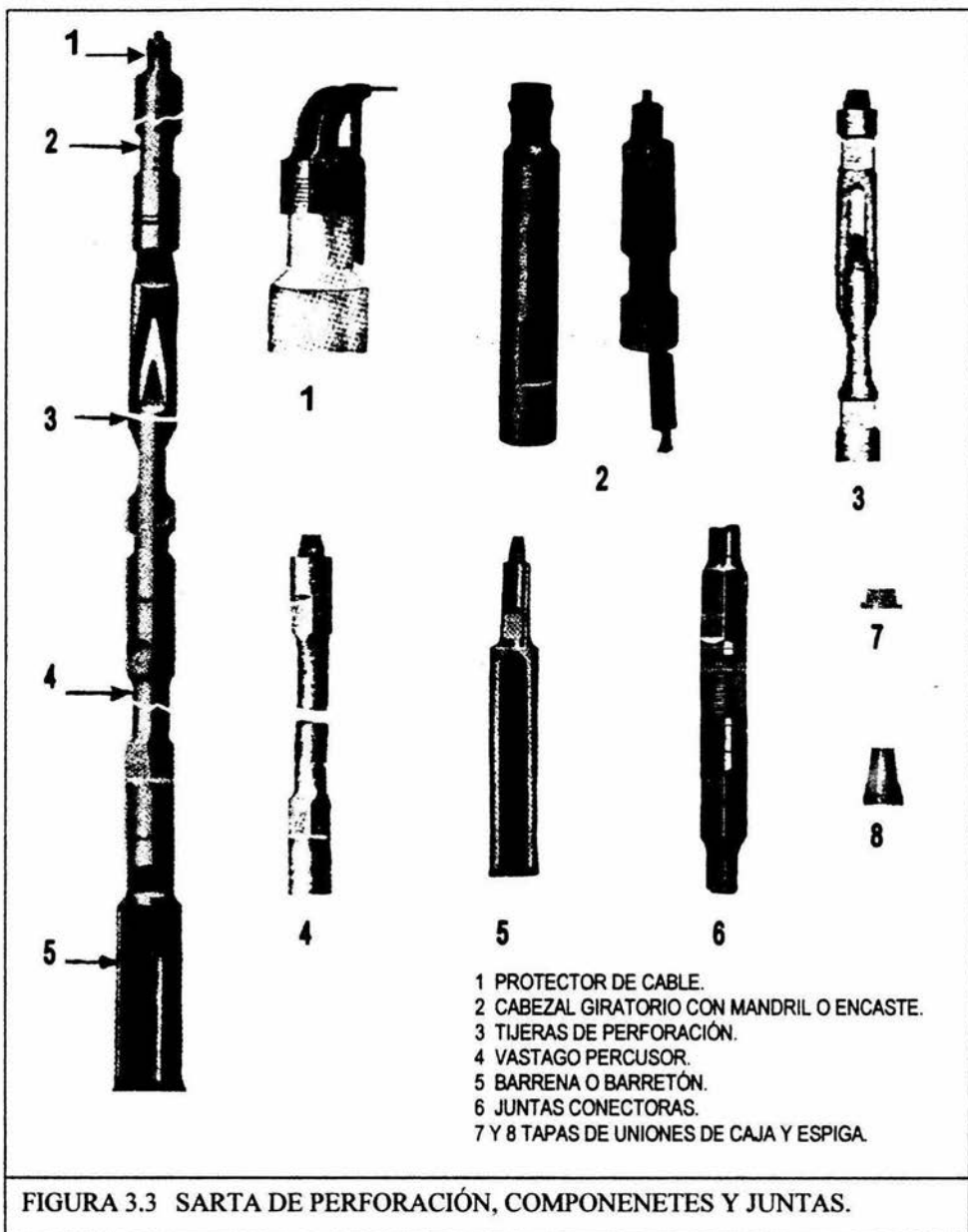
2.- *Cabezal giratorio.* Es de sección cilíndrica con una perforación concéntrica de diámetro tal que permite el alojamiento de una bala o mandril, que sirve de unión a la línea o cable de perforación con las herramientas de la sarta. Tiene por objeto permitir que la sarta gire después de cada golpe. Se recomienda efectuar revisiones periódicas en la unión del cable para evitar que los materiales abrasivos que pudieran existir durante la perforación lo desgasten en el cuello, además se deben limpiar las perforaciones que existen en el cuerpo del cabezal para evitar atascamientos y facilitar su rotación.

3.- *Tijeras de perforación.* Consisten en dos piezas eslabonadas, por medio de dos bridas telescópicas enganchadas y con un cierto juego entre sí por la parte central de la herramienta. La función básica de las tijeras consiste en extraer la herramienta, cuando ésta se atasca en el pozo, teniendo en cuenta que un golpe brusco es más efectivo que un jalón firme; cuando la sarta cae rápidamente dentro de la perforación, e induce un estirón en el cable, suficiente para que las bridas de las tijeras se junten; las tijeras se abren cuando el cable es izado en la carrera ascendente del balancín de la perforadora con lo cual se causa un fuerte golpeo ascendente a las herramientas de perforación.



4.- *Vástago percusor*. Es un elemento que normalmente integra la sarta de perforación, para proporcionarle el peso necesario que requiere para una operación satisfactoria. Consiste esencialmente en una barra de acero muy pesada y cilíndrica, esta pieza va entre las tijeras y el barretón. El tamaño del percusor se elige de acuerdo con la profundidad y diámetro de la perforación y con el tipo de formación en que se trabaja. Frecuentemente se montan varios vástagos percusores para darle el peso necesario a la sarta de perforación.

5.- *Barrena o barretón*. Es la herramienta cortante que va montada en el extremo inferior de la sarta, que perfora directamente, golpeando, rompiendo y triturando las rocas y partículas de la formación, hasta reducirlos a fragmentos que puedan ser fácilmente extraídos con la cuchara de la perforadora.



6.- *Uniones de las herramientas.* Se realizan mediante juntas conectoras, una rosca cónica (espiga) que ajusta una rosca hembra (caja). Las cuerdas se fabrican de modo que ajusten perfectamente sin dejar espacios libres. Se insiste en tener especial cuidado en el manejo de las cuerdas para mantenerlas en perfectas condiciones, se deberán conservar limpias y libres de óxido; si las caras de fricción o la parte final de las cuerdas, estuvieran oxidadas o presentarían una superficie áspera, se deberán limpiar o pulir con piedras de esmeril suave, pómez o lija fina hasta que queden totalmente suave. Cuando las herramientas no se usen, deberán cubrirse todas las uniones lubricadas con el protector correspondiente.

De acuerdo con los materiales por perforar se emplean varios tipos de barrena: barrena estándar, barrena tipo cruz, barrena corta y barrena torcida, estas se muestran en la figura 3.4.

1.- *Barrena estándar.* Es de uso común, ya que se emplea para cortar formaciones suaves o duras, variando el tipo de afilado. Recibe el nombre de califormia cuando su diámetro es mayor de 213 mm (8"); cuando este es menor, se le llama regular o estándar.

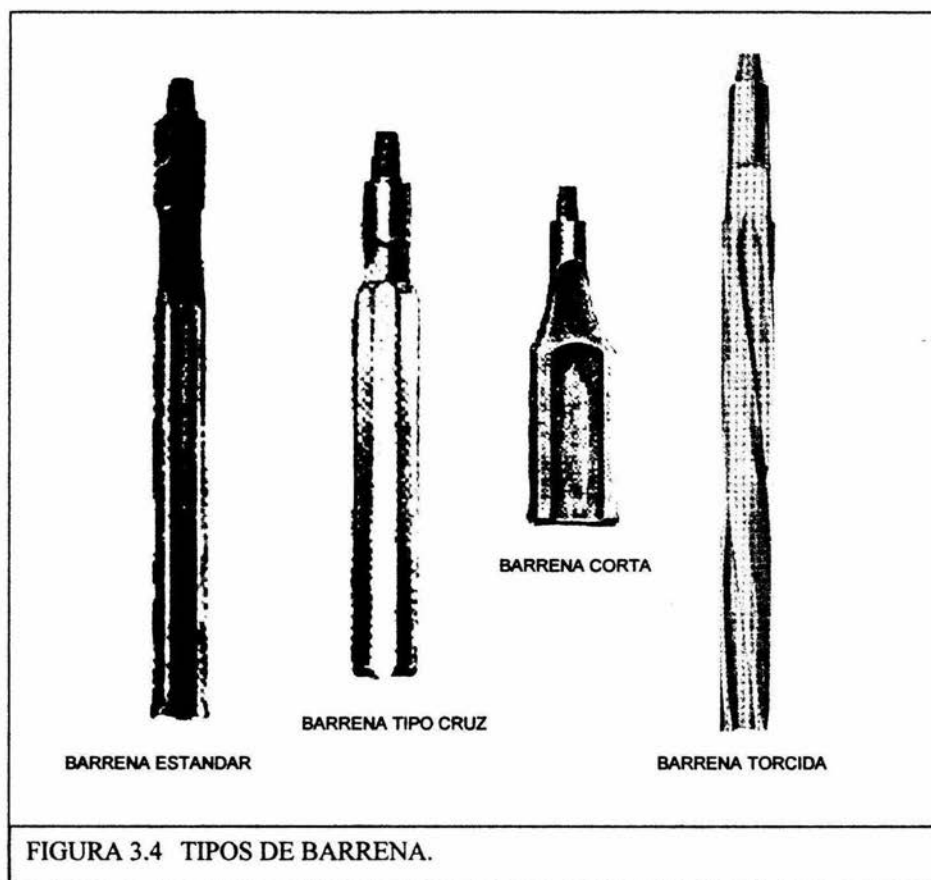


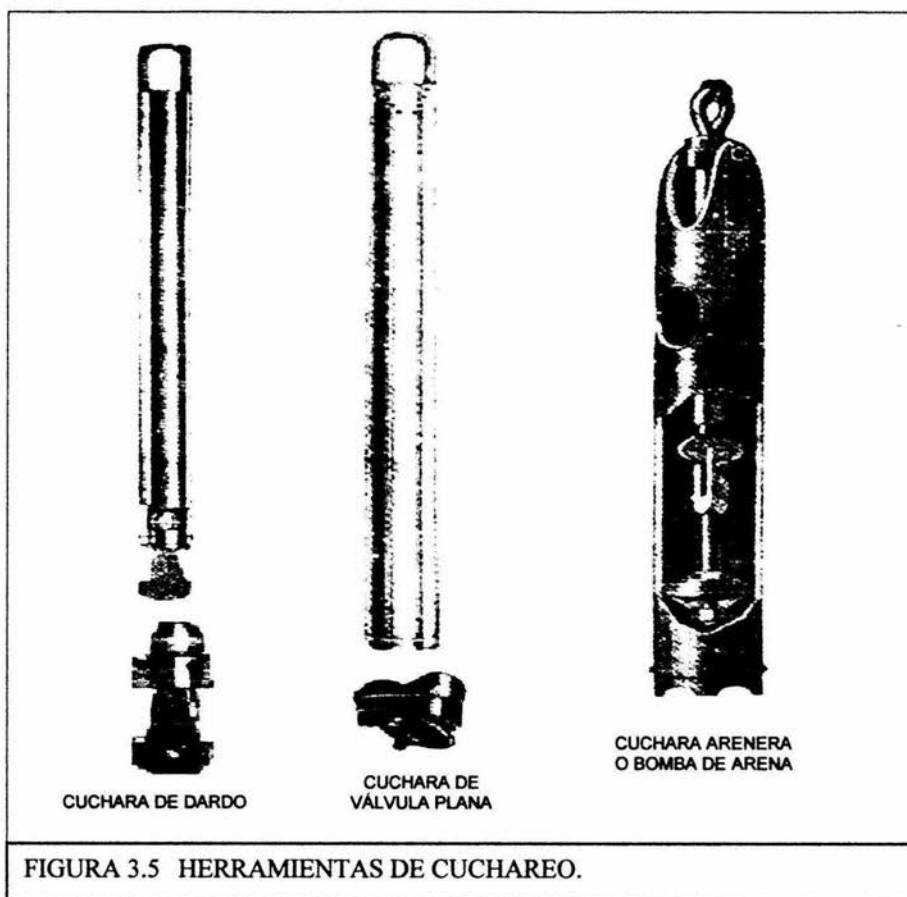
FIGURA 3.4 TIPOS DE BARRENA.

2.- *Barrena tipo cruz o estrella*. Se usa para perforar formaciones fisuradas o inclinadas que tienden a desviar las herramientas de la vertical. El cuerpo de esta barrena tiene cuatro pasos de agua y el diámetro de la sección del cuerpo, es ligeramente menor que el área de corte. Los cuatro puntos de corte lo hacen un elemento particularmente efectivo para escariar y enderezar pozos, para que su empleo sea eficaz debe ser correctamente afilado con ángulos aguzados y tener un área de corte máxima.

3.- *Barrena corta*. Tiene la finalidad de iniciar la perforación, es un trépano regular o californiana más corto y de menor peso lo que le permite ser guiado con mayor facilidad.

4.- *Barrena torcida*. Tiene características que la hacen producir un mayor batido que la californiana y la estándar. Actúa como una bomba manteniendo en suspensión mayor cantidad de material, tiene la ventaja de producir perforaciones más derechas, sin embargo el uso de esta barrena eleva el costo de la perforación.

Herramientas para el cuchareo. Son: cuchara de válvula plana, cuchara de válvula de dardo y cuchara arenera o bomba de arena; como se ven en la figura 3.5.



1.- *Cuchara de dardo*. Es la más usada en operaciones de cuchareo, la válvula de dardo se abre cuando ésta, entra en contacto con el lodo del fondo del pozo, al levantar la cuchara, la válvula cierra automáticamente atrapando el contenido.

2.- *Cuchara de válvula plana*. Es la más común y está formada por un tubo de diámetro inferior al del pozo; en su parte superior tiene soldada o remachada un asa que se une al cable de la línea de cuchareo y en la parte inferior una válvula que tiene un movimiento de bisagra, al sumergirla en el lodo, la válvula se abre y penetra el material, cerrándose por el peso de este al levantarla.

3.- *Cuchara arenera*. Está compuesta por un tubo con una válvula y un émbolo que trabaja dentro del cuerpo de la bomba, el cable de cuchareo, se acopla a la parte superior de vástago del émbolo, el cual al levantarse y estando dentro del pozo succiona el material dentro de la bomba, cuando el émbolo llega a la parte superior del compartimiento, se levanta la bomba y la válvula cierra, para vaciarla se desconecta la válvula.

El cuchareo consiste en extraer los materiales producto del corte de la perforación del fondo del pozo por medio de baldes de limpieza diseñados para tal efecto, los cuales son manejados por medio de un cable, conocido con el nombre de cable de cuchareo, enrollado del malacate para tal efecto, con controles individuales a los de la sarta de perforación.

Herramientas de pesca. Se utilizan los: arpones, pescantes de pasador, pescantes de gancho y pescantes para espigas, estas se muestran en la figura 3.6.

1.- *Arpones*. Se emplean de una o dos lanzas, cuando hay rotura de: herramientas, juntas conectoras o del cable y si caen herramientas al interior de la perforación.

2.- *Pescantes de pasador y gancho*. Se usan cuando hay roturas de las herramientas.

3.- *Pescantes para espigas*. Se emplean cuando hay desatornillado de juntas.

Cuando hay derrumbes o caídos en los pozos y la sarta queda atorada es necesario cortar el cable y limpiar el pozo hasta descubrir la herramienta, para que posteriormente se pueda utilizar el pescador adecuado.

Para evitar el proceso de pesca que puede ser tardado, además de costoso, se recomienda: examinar las líneas de perforación y cuchareo, esto para prevenir fracturas; cada vez que se haga el cuchareo, se debe revisar que las juntas conectoras de las herramientas no estén flojas ni demasiado apretadas ya que esto causa fatigas en las mismas, provocando su rompimiento.

Proceso de perforación. Para iniciar éste, se instala el bastidor o chasis, se estabiliza este con gatos u otros dispositivos adecuados, después se iza y contra ventea la torre telescópica y se procede a montar la sarta de perforación según la secuela rutinaria siguiente:



- 1) Una vez asegurado el cable de perforación en el mandril del cabezal giratorio, se limpian las juntas conectoras de todas las herramientas de la sarta, incluyendo sus hombros y caras externas, aplicando aceite de máquina sobre las cuerdas de las espigas y cajas.
- 2) Después se conectan el cabezal giratorio, la barrena y el vástago percusor a mano, para apretar sus juntas con las llaves disponibles.
- 3) Ya apretadas las juntas conectoras, se eleva lentamente el cable de perforación, alineándolo al extremo del cabezal giratorio para que al efecto de izar la sarta el cable no sufra atorones, dobleces o torceduras que lo debiliten o rompan.
- 4) Ya elevada la sarta se deberá verificar que cuelgue centrada y libre de la polea de la cabeza del mástil de perforación.

La perforación con máquinas de percusión tipo pulseta, se efectúa aplicando el principio de la caída libre de un peso formado por la sarta de perforación, la cual pende del cable de perforación, el que pasa por la polea de la torre telescópica de la perforadora, prosiguiendo por la polea del balancín de la máquina, para quedar enrollado en el tambor de perforación, el cual va largando cable a medida que se profundiza el pozo, y lo recupera, enrollándolo cada vez que es necesario izar la sarta de perforación para las maniobras de cuchareo.

El movimiento oscilante del balancín de la máquina es el que imparte y regula la carrera reciprocante de la sarta de perforación. En la carrera descendente la sarta cae libremente, con lo cual la barrena golpea con un efecto percusor, para romper y triturar el fondo del pozo; en la carrera ascendente la sarta debe girar libremente para permitir que la circulación de los fluidos de perforación mezcle y remueva el corte o producto de la

perforación, así como para refrigerar la barrena e impedir que los lodos formados en el fondo del pozo puedan producir un atascamiento de la sarta.

Para iniciar la perforación, ya instalado el equipo, la sarta se suspende de forma centrada y libre de la polea de la corona del mástil, después se bajará hasta marcar fuertemente en el suelo el sitio en que quedará el brocal del pozo a perforar. Se debe tener cuidado de que la sarta caiga libremente, ya que si esto no ocurre, la excavación que se hará para guiar la sarta puede ser ineficiente.

Cuando la perforación se inicia en un suelo suave, se suele realizar una excavación con pala de 0.60 a 1.00 metro de profundidad, posteriormente se deja caer la sarta hasta que los filos de la barrena descansan en el fondo del agujero, el cual se llena de agua, iniciándose así la perforación, moviendo la sarta por medio del balancín a carrera muy corta, guiándolo manualmente hasta alcanzar una profundidad del orden de 2.00 metros, después de la cual, la sarta se corre a una velocidad normal de perforación. Para iniciar una perforación sobre roca o suelo duro se excava un agujero de 15 a 20 cm de profundidad por medio de cincel o cuñas y martillo, a continuación se centra un tubo que, sujeto al mástil con cadenas, sirve de guía a la sarta. Una vez que se han alcanzado profundidades adecuadas (2 metros), las herramientas se corren a velocidad normal de perforación.

Una perforación húmeda es aquella que se realiza en un pozo dentro del cual hay más agua de la necesaria para perforar. La perforación en seco es aquella en la que no hay agua natural en las formaciones cruzadas, solo en las del acuífero productor. En general en una perforación en seco se avanza más rápidamente, ya que la sarta no recibe efectos de amortiguación ni flotación y el cable estira mejor que con humedad. Las herramientas perdidas en un pozo seco se pescan más fácilmente.

Cuando las formaciones perforadas son inestables (principalmente de arenas y gravas), se tiene una tendencia a producir caídos y derrumbes, lo cual se agrava con las turbulencias que provoca el movimiento de la sarta en el agua somera en las perforaciones húmedas y la vibración en las perforaciones secas, a tal grado de que en ocasiones es necesario perforar con el auxilio de lodos de perforación y, en casos extremos, se tienen que perforar hincando un ademe a medida que se avanza en profundidad, siendo este último procedimiento muy costoso. El empleo de lodos desvirtúa las ventajas de la perforadora de pulseta.

En la perforación de pozos es necesaria el agua, la cual se debe proveer cuando esta ausente en las formaciones perforadas, eventualmente en grandes cantidades, debido a que por las grietas y fracturas de las rocas perforadas o formaciones permeables, se tienen pérdidas. En condiciones normales se suelen requerir de 100 litros por cada metro de perforación, cantidad que aumenta notablemente en formaciones cavernosas, fracturadas o muy permeables, como en rocas calizas, basálticas secas, arenas y gravas. Cuando la pérdida de agua adquiere proporciones peligrosas o muy serias, se llega a imponer la necesidad de perforar con lodos bentoníticos, tanto para reducir las pérdidas de agua, como para enjarrar y estabilizar las paredes de los pozos en que ocurren peligrosos caídos y derrumbes debido al constante flujo de agua.

En perforaciones que cruzan estratos arcillosos es muy benéfico y conveniente añadir arena o arenisca al agua de perforación, con lo cual se tienen mayores avances y se reduce el peligro de pérdidas de las herramientas. En la perforación de esquistos,

lutitas y pizarras, el lodo producto de las mismas tiene particular tendencia a secarse y solidificarse rápidamente, con peligro de atascar la sarta de perforación. Ante tal eventualidad que implica serio riesgo, se recurre al recurso de ademar el tramo peligroso, cruzarlo rápidamente sin dar tiempo a que los lodos se sequen, o bien, se baja una tubería de 38.1 mm (1 ½ ") o 50.8 mm (2") de diámetro, por la que se inyecta agua a presión para hacer flotar y expulsar los lodos. Adicionalmente, estos lodos de alta viscosidad entorpecen grandemente la carrera de la sarta y dificultan su extracción.

Para ademar el pozo siempre será mejor que las formaciones cruzadas durante la perforación sean estables, debido a que si son recurrentes los derrumbes de las paredes, será necesario hincar el ademe conforme se avance en la perforación, elevando el costo, ya que se requiere un diámetro mayor al hidráulicamente necesario; debido a que conforme se dificulta el hincado la tubería, éste se debe abandonar y reiniciar con diámetros decrecientes conforme se avanza en profundidad. Otros factores que elevan el costo son: la elaboración de las ranuras o aberturas de la tubería productora, no es lo mismo realizarlas en un taller, que estando la tubería dentro del pozo; en caso que se hinquen con ranuras pueden sufrir un debilitamiento y a la postre causar la ruptura del ademe; de ser necesario el uso de filtro, no es posible colocar uno artificial, y el control de los finos podrá causar problemas al equipo de bombeo.

b) Equipo rotatorio.

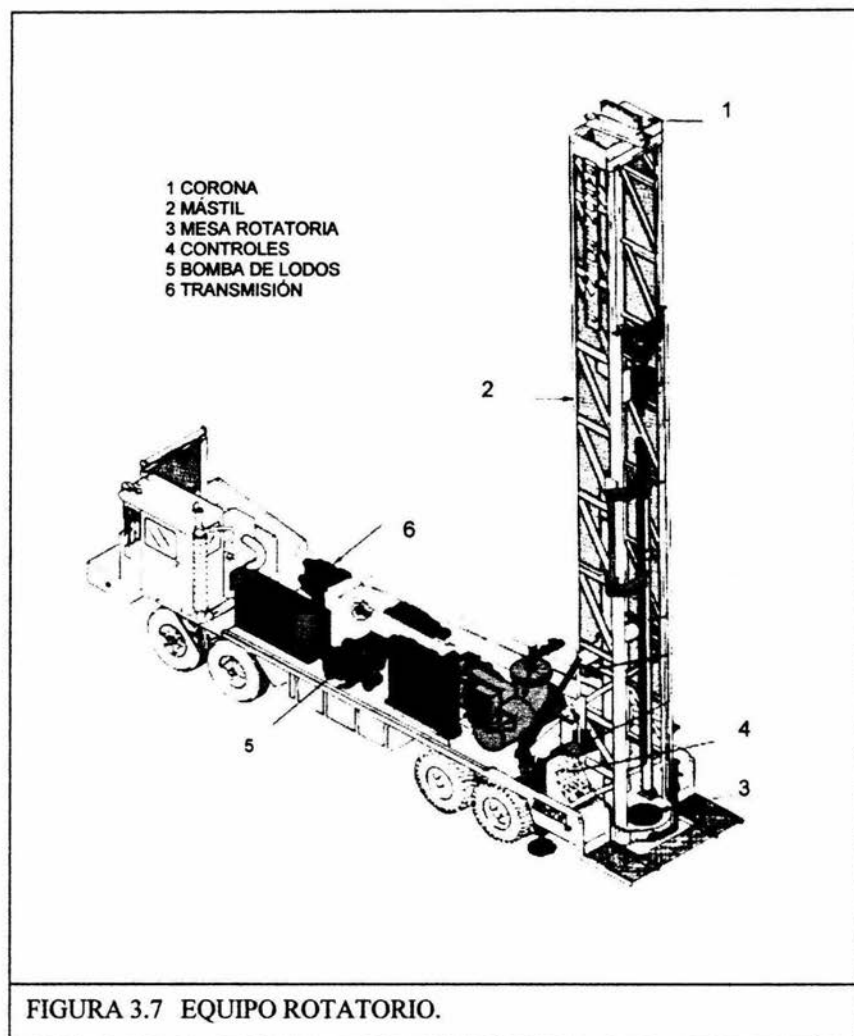
Este equipo consta esencialmente de una barra para perforación y una plataforma, en esta se instalan: malacates con tambores para izar la tubería de perforación, una bomba de lodos de desplazamiento positivo, una unidad de potencia para hacer trabajar a todos los motores utilizados, una torre o mástil de perforación que se levanta y se dobla hidráulicamente, una mesa rotatoria, en ocasiones un "pull down" (este es un mecanismo hidráulico que ejerce presión descendente en la herramienta de perforación), los controles se encuentran a un lado del mástil. Este equipo se muestra en la figura 3.7.

Este procedimiento consiste en una perforación, mediante la acción rotatoria de una barrena; la remoción de los fragmentos se efectúa a través de un fluido que continuamente se hace circular, conforme la barrena penetra en los materiales de la formación o formaciones que se atraviesan. Existen dos procedimientos que se realizan con este equipo: rotatorio de circulación directa y rotatorio de circulación inversa.

Equipo rotatorio de circulación directa. Esta constituido por: bomba de lodos, unión giratoria, barra de perforar y mesa rotatoria, este equipo se muestra en la figura 3.8.

1.- *Bomba de lodos.* Normalmente es de tipo pistón, de doble acción que bombea a ambos lados del pistón, debe de contar con cámara de alivio y válvula de seguridad.

2.- *Unión giratoria.* Es una caja cerrada con cojinetes para aceite de alta capacidad a los esfuerzos axiales, un juego de sellos de grasa generalmente formados por anillos de metal, hule o fibra que forman un sello contra el elemento giratorio dispuestos de tal manera que los materiales abrasivos de los lodos de perforación no entren en contacto con los cojinetes. Su función consiste en suspender la flecha de transmisión y la tubería de perforación, así como permitir la rotación libre de estos y el paso de los fluidos de perforación. En su parte superior tiene una curvatura en la cual se conecta la manguera de alta presión de lodos.



3.- *Barra de perforar.* Consta de cuatro partes: la barrena, uno o más tubos de lastrabarrena, uno o más tramos de tubería de perforación y la flecha de transmisión (kelly), que va conectado a la unión giratoria; esta flecha pasa y se fija en la mesa giratoria. La forma de la flecha puede ser cuadrada, hexagonal o cilíndrica con ranuras longitudinales. Mientras la flecha se desliza hacia abajo entre los cojinetes de guía para seguir el descenso de la barrena conforme avanza la perforación.

4.- *Mesa rotatoria.* Su función es transmitir el movimiento giratorio a la flecha de transmisión, y por consiguiente a la barrena. La mesa se debe poder retraer, dejando espacio para la colocación de la tubería de ademe.

- 1 BOMBA DE LODOS
- 2 UNIÓN GIRATORIA
- 3 BARRA DE PERFORAR
- A) FLECHA DE TRANSMISIÓN
- B) LASTRABARRENA
- C) BARRENA
- D) TUBERÍA DE PERFORACIÓN
(DESCENSO DEL LODO)
- 4 MESA ROTATORIA
- 5 ELIMINACIÓN DE RECORTES
- E) ESPACIO ANULAR, ASCENSO
DEL LODO
- F) FOSAS DE SEDIMENTACIÓN
- G) FOSA DE BOMBEO
- H) CANAL

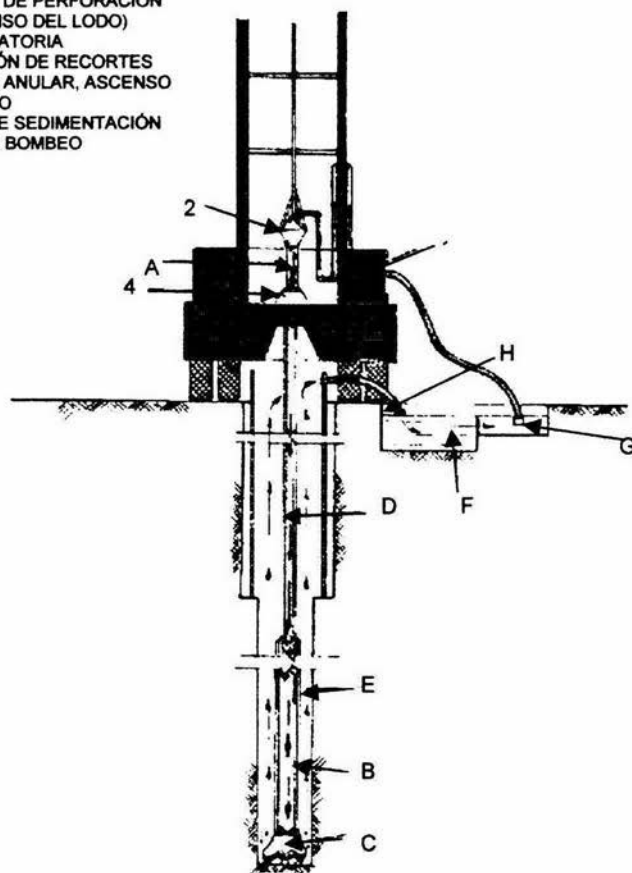
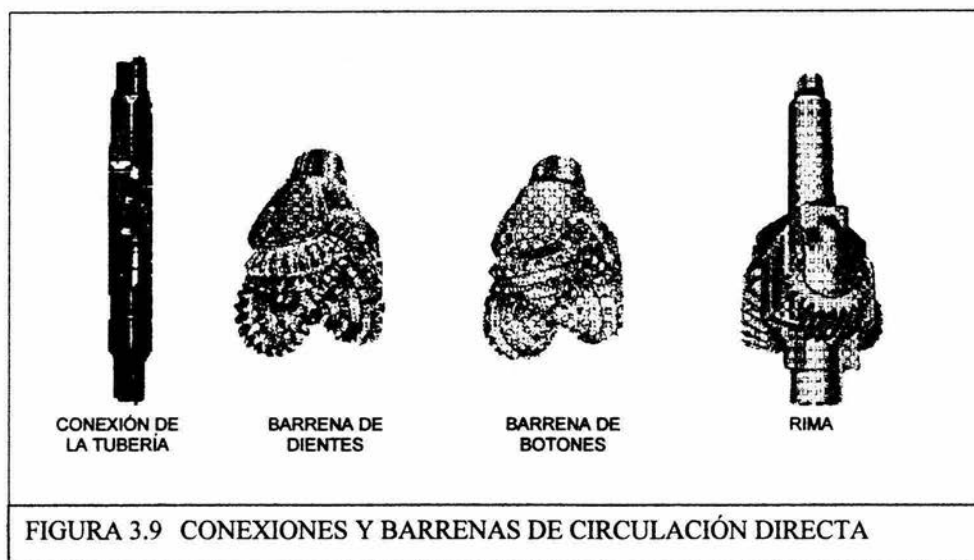


FIGURA 3.8 PERFORACIÓN ROTATORIA DE CIRCULACIÓN DIRECTA.

5.- *Eliminación de recortes.* Cuando el fluido de perforación utilizado en este proceso es lodo, este es bombeado a través de la tubería y expulsado por unos orificios que se encuentran en la barrena. El lodo fluye hasta la superficie, por el espacio anular que se halla entre la tubería y las paredes de la perforación, hasta salir por el brocal del pozo e ingresar a un canal que lo lleva a una fosa de sedimentación, dicha fosa esta conectada a la de bombeo del lado opuesto al canal, para que el material producto de la excavación sedimente y el fluido limpio pase a la segunda fosa para ser reutilizado, como se muestra en la figura anterior.

Este equipo utiliza: tubería, barrenas y rimas; bien definidos, como se muestra en la figura 3.9.



Tubería de perforación. Esta constituida por tramos de 6.10 metros de largo, su diámetro va de 63.5 mm (2 ½ ") a 114.3 mm (4 ½ ") y su conexión es a base de espigas y cajas como se observa en la figura anterior.

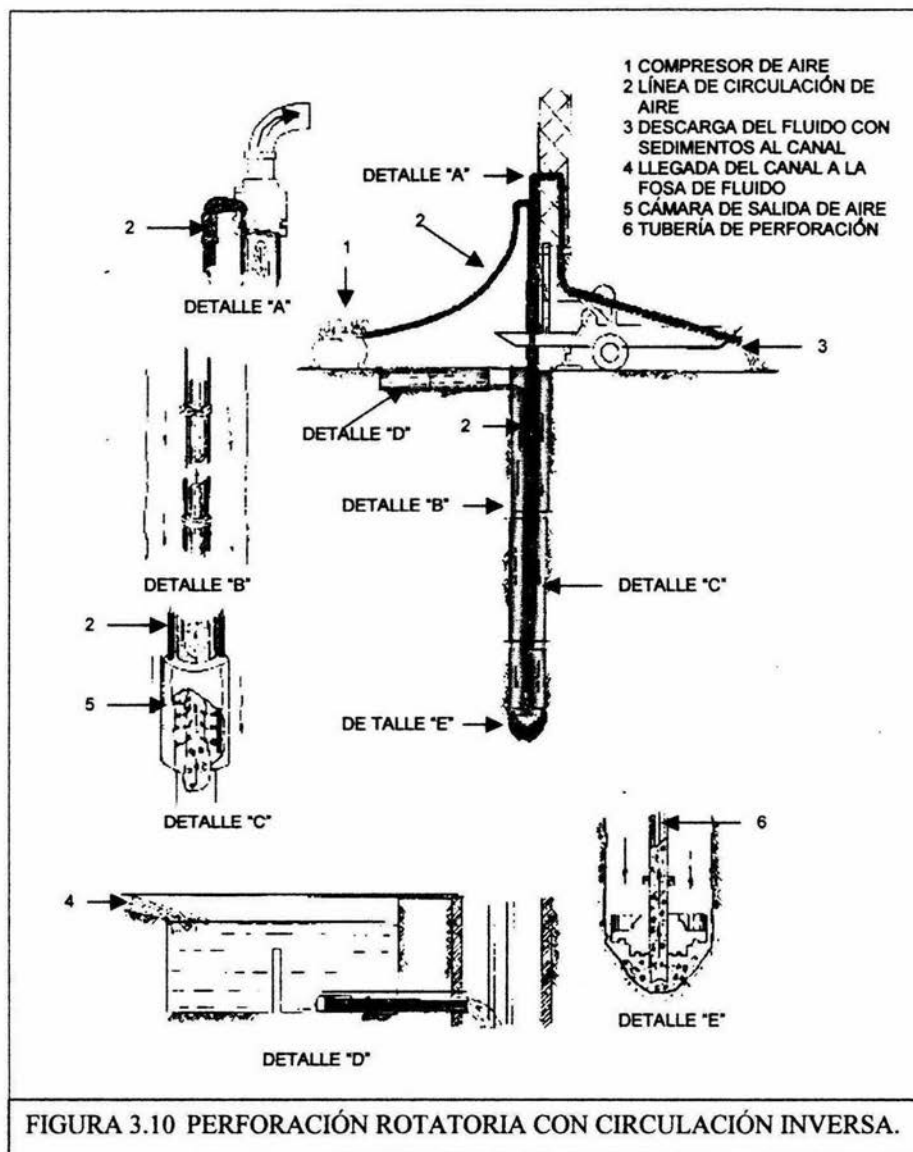
Barrenas. En este método las utilizadas normalmente son de rodetes dentados o conos, ejercen una acción cortante y de trituración conforme giran, logrando cortar las formaciones duras con efectividad. Los rodetes o conos son dotados de gran variedad de dientes, en cuanto a su número, longitud y forma; dependiendo esto del tipo de formación que se deba perforar. Las barrenas más usuales son las tricónicas, estas tienen tres rodetes con un ángulo de inclinación hacia el centro de la perforación, como se muestran en la figura anterior. Del interior de la barrena y por la parte superior de cada rodete, existen boquillas, las cuales dirigen chorros de fluido de perforación, estos lavan y enfrían las superficies cortantes, para disminuir el desgaste.

Rima. Esta tiene cuatro rodetes fijados al eje vertical, se utilizan cuando es necesaria una ampliación del diámetro de la perforación.

Debido a que este equipo requiere estabilizar las paredes de las formaciones que perfora, extraer los recortes del fondo del pozo y minimizar las probabilidades de contaminación, cuando existen acuíferos indeseables, se emplean lodos bentoníticos principalmente como fluidos de perforación. Este procedimiento provoca turbulencias al ascender el fluido entre la tubería y las paredes de la perforación, los lodos estabilizan el espacio anular, mientras que con agua, las paredes tienden a socavarse. El agua se recomienda utilizar como fluido de perforación cuando se perforan materiales duros, donde las pérdidas por filtración de esta sean mínimas.

Equipo rotatorio de circulación inversa. Existen dos variantes, la primera utiliza un compresor de aire, tanques de almacenamiento, línea de circulación de aire, mientras que la segunda utiliza una bomba centrífuga de gasto elevado y carga dinámica baja. Ambos están constituidos por: unión giratoria, barra de perforar y mesa rotatoria.

Primera variante. Utiliza el compresor para inyectar aire al interior de la tubería de perforación, provocando con esto turbulencias en el interior de ésta, las turbulencias no afectan la estabilidad de las paredes del pozo como se muestra en la figura 3.10.



En este procedimiento de perforación el fluido es tomado de una fosa, para ser transportado por un tubo que lo lleva hasta la excavación; el fluido baja por el espacio anular que se halla entre la tubería y las paredes de la perforación, de aquí asciende por el interior de la tubería de perforación, ya con los recortes producto de la perforación (debido a la turbulencia provocada por el aire en el interior de la tubería), hasta salir por el cabezal giratorio; del cabezal es llevado por una tubería hasta el nivel de terreno, para ser depositado en un canal; este lo lleva hasta la fosa de fluidos, para que el material producto de la excavación sedimente a lo largo del canal o en la primera fosa, para no contaminar con estos sedimentos la fosa que tiene conectado el tubo hacia la perforación, como se muestra en el detalle "D" de la figura 3.10.

Este equipo utiliza tubería de perforación, barrenas y fluidos diferentes a los del equipo de circulación directa, esto se observa en la figura 3.11.



FIGURA 3.11 TUBERÍA Y BARRENAS DE CIRCULACIÓN INVERSA CON AIRE.

Tubería. Tiene una longitud de 3.05 y 6.10 metros, mientras que su diámetro es de 152.4 mm (6"), tiene en sus extremos bridas, que se unen por medio de tornillos y tuercas, con empaques intermedios para evitar fugas. Las tuberías de inyección de aire se instalan paralelas y diametralmente opuestas a la de perforación, unidas a esta a través de las bridas, como se aprecia en la figura anterior. La longitud total de la tubería de inyección, será igual a la de la presión que puede proporcionar el compresor.

Barrenas. En este procedimiento se utilizan las de: tipo cola de pescado y de tres aletas, estas aletas son regularmente cortas y cada una de ellas tiene filo cortante con un tratamiento endurecedor en la superficie, estas barrenas ejercen rápidamente su acción cortante en arcillas y arenas, pero no son eficientes en grava gruesa o en formaciones rocosas. Entre las aletas debe existir un orificio de gran diámetro (cercano al de la tubería de perforación), por el cual el fluido de perforación sube al material producto de la excavación.

El fluido de perforación que se utiliza es agua, ya que el aire se mezcla más fácilmente con esta que con lodos, el agua deberá tener una alimentación continua. La mezcla agua-aire provoca que haya menor presión dentro de la tubería que fuera de ésta, haciendo subir el fluido, cuando este proceso provoca inestabilidad en las paredes del pozo, es necesario utilizar lodos en vez de agua, aunque esto provoque una disminución en el rendimiento de la velocidad de avance de la perforación. Es inevitable el uso de lodos, cuando hay formaciones muy permeables no saturadas, las cuales provocan un gran consumo de agua, lo cual no es rentable.

Segunda variante. Utiliza la bomba centrífuga de gasto elevado y carga dinámica baja para absorber el fluido que se utiliza para extraer el material producto de la perforación. Su esquema es igual al mostrado en la figura 3.8, con la diferencia de que la bomba centrífuga sustituye a la bomba de lodos.

Este procedimiento de perforación combina la tubería y barrenas de los métodos anteriores:

Tubería. Es de 6.10 metros de largo y su diámetro va de 63.5 mm (2 ½ ") a 114.3 mm (4 ½"), su conexión es a base de espigas y cajas como se observa en la figura 3.9.

Barrenas. Se utilizan las de: tipo cola de pescado y de tres aletas, como se muestran en la figura 3.11.

Este procedimiento para extraer el material producto de la excavación, utiliza agua, eliminando éste del interior de la tubería de perforación, por el cabezal giratorio, pasando por la bomba y depositándola en un canal de recuperación que conduce el agua con los recortes a la fosa de fluidos. El canal sirve para la recuperación de los ripios, como en el procedimiento anterior el agua estabiliza las paredes de la perforación, el agua deberá tener una alimentación continua y no bajar más allá del nivel freático, debido a que la bomba debe ser de alto gasto pero de baja carga dinámica. Cuando este proceso provoca inestabilidad en las paredes del pozo, es necesario utilizar lodos en vez de agua, aunque esto provoque una disminución en el rendimiento de la velocidad de avance de la perforación, y sea necesaria una bomba de lodos en vez de la centrífuga. En formaciones permeables no saturadas, las cuales provocan que el nivel del agua baje más allá de la carga dinámica de la bomba centrífuga, será necesario el empleo de lodos con su respectiva bomba.

c) Equipo neumático.

Este equipo es similar al que se utiliza en el procedimiento rotatorio, consta esencialmente de: tubería de perforación; trépanos o barrenas y una plataforma donde se instalan: malacates con tambores para izar la tubería de perforación, una bomba de lodos de desplazamiento positivo, una unidad de potencia para hacer trabajar a los motores utilizados, un mástil de perforación que se levanta y se dobla hidráulicamente, una mesa rotatoria y un compresor de aire de gran capacidad, el aire se utiliza como fluido y para darle potencia al martillo neumático; la plataforma requiere de un lastre, esto para cuando se perforan masivos rocosos o formaciones de dureza similar y no haya efecto de flotación; los controles se encuentran a un lado del mástil. Ya que el equipo neumático que se utiliza es análogo al rotatorio, incorporando un compresor de aire de gran capacidad.

La perforación con equipo neumático tiene dos variantes: perforación con rotación y la combinación del martillo a percusión con el rotatorio.

Equipo neumático a rotación. Cuando se utiliza aire como fluido, se hace circular éste a presión por la tubería de perforación, el cual escapa por las aberturas del trépano, subiendo luego por el espacio anular que rodea a la tubería (la figura 3.8 sirve como referencia, ya que el procedimiento es similar al de la perforación rotatoria de circulación directa). El aire se desplaza a gran velocidad, arrastrando consigo los ripios hasta la superficie, en ocasiones es necesario el uso de espumantes, esto para disminuir el consumo de aire a utilizar, así como para lubricar y enfriar la barrena. El procedimiento con aire solo se puede aplicar en formaciones consolidadas y semi-consolidadas, mientras que en formaciones inestables se deben utilizar lodos como fluidos de perforación, si se quiere evitar el uso de lodos, se tiene que instalar un ademe a lo largo de la formación inestable. En formaciones duras se deben usar barrenas tricónicas de botones o con incrustaciones de carburo de tungsteno, fijadas a la periferia de los rodetes de acero, en formaciones menos duras se utilizan barrenas tricónicas de dientes, ambas barrenas se muestran en la figura 3.10, así como la tubería de perforación que se utiliza.

Equipo neumático que combina el martillo percusor con la rotación. Este logra una gran velocidad de penetración a cualquier profundidad, en virtud de que no existen pérdidas de energía, ya que el pistón del martillo transmite directamente sobre la barrena la acción percusiva, así como la carrera corta y la gran velocidad de impacto del martillo sobre los materiales. Las barrenas utilizadas en este proceso tienen insertos de carburo de tungsteno como se muestra en la siguiente figura, la tubería de perforación es similar a la mostrada en la figura 3.8.

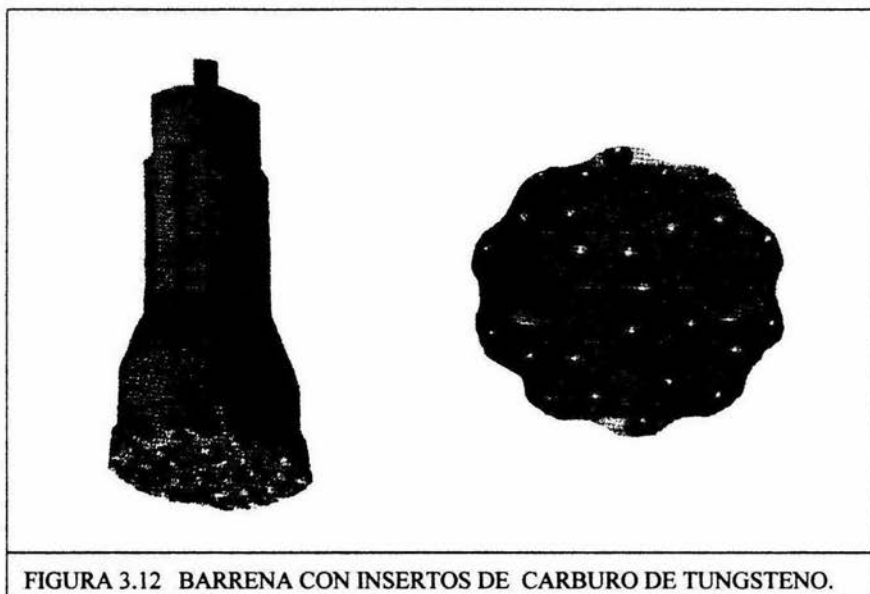


FIGURA 3.12 BARRENA CON INSERTOS DE CARBURO DE TUNGSTENO.

Se emplea aire como fluido de perforación cuando se perforan macizos rocosos o formaciones compactas, cuando se perforan formaciones sueltas o cavernosas se pueden provocar derrumbes, por lo que en estos casos se debe emplear lodo como fluido.

El proceso de extracción de los cortes de los materiales atravesados se realiza de la misma forma que en el proceso anterior.

d) Selección del equipo de perforación.

De acuerdo con las formaciones que se deben perforar se debe utilizar un equipo específico, esto para tener un mejor rendimiento en cuanto a la velocidad de perforación y a la eficiencia del equipo.

Cuando se trata de formaciones de granitos, basaltos, andesitas, riolitas o tobas (estratos duros), se pueden perforar con equipo de percusión o empleando el neumático combinado (rotatorio con martillo) y como fluido de perforación en este último aire o espumante. Cuando estos estratos se encuentren cubiertos por aluviones se debe tener cuidado de perforar estos con lodo como fluido de perforación y colocar un ademe o contra-ademe para evitar los derrumbes en las paredes de la perforación.

En formaciones de calizas, margas, conglomerados, areniscas y lutitas (estratos compactos de dureza media), se recomienda utilizar cualquier equipo, siendo los rotatorios los que tienen la ventaja en cuanto a rendimiento, porque se utilizan lodos como fluido de perforación debido a la inestabilidad de dichas formaciones y también a su dureza. El equipo neumático se justifica cuando se crea la posibilidad de estratos intercalados de mayor dureza.

Cuando se trata de formaciones duras pero fracturadas como pueden ser las de granitos, basaltos, pizarras, esquistos, principalmente, se recomienda el empleo de equipos rotatorios, esto debido a que se deben utilizar lodos como fluidos de perforación para estabilizar las paredes de la perforación. Si se trata de equipo neumático y se utiliza aire como fluido se pueden provocar derrumbes; así mismo cuando se utiliza el equipo de percusión tipo pulseta, como utiliza agua para estabilizar las paredes, esta se infiltra provocando un gasto excesivo de la misma.

Los aluviones son formaciones no consolidadas formadas generalmente por capas intercaladas de gravas, arenas, arcillas y limos o depósitos heterogéneos de estas, por lo que es recomendable debido a su inestabilidad la perforación rotatoria de circulación directa, empleando lodos como fluido de perforación.

Cuando se utilizan lodos como fluido de perforación y existen grandes pérdidas en su circulación, esto obliga a que se haga un cambio en el equipo de perforación por uno de percusión, ya sea el de tipo pulseta o el neumático, buscando la manera de controlar los derrumbes.

3.2.b Programa de perforación.

Después de haber seleccionado el equipo de perforación, de acuerdo al sondeo geoelectrico, el cual indica el tipo de estratos que se atravesarán durante el trabajo, se debe tener en cuenta dentro del programa de perforación: el fluido adecuado para estabilizar las formaciones y tener un avance rápido; la toma de muestras del o los estratos perforados, para obtener el corte geológico y su granulometría; la corrida del registro eléctrico, para ubicar él o los acuíferos aprovechables, la correlación de estos

datos servirá para el diseño del filtro, la tubería productora y en caso de ser necesario la elaboración de cementaciones para sellar acuíferos salinos o contaminados.

a) Fluidos de perforación.

El fluido de perforación depende principalmente del equipo de perforación que se utilice y el tipo de formaciones que se atraviesen durante el trabajo. Los fluidos más utilizados son: agua, aire comprimido, espumantes y lodos.

El agua. Se utiliza con equipos de percusión y para la elaboración de lodos y espumantes.

Aire comprimido. Se utiliza con equipos de perforación neumática, este procede de un compresor que lo fuerza por el interior de la tubería de perforación, se recomienda que la velocidad del aire en el espacio anular sea de 4000 pies por minuto o mayor, para salir al fondo de la misma, por los ductos diseñados para tal efecto (según sea el tipo de barrena que se utilice), el aire comprimido se encarga de mantener refrigerada la sarta y herramientas de perforación, a la vez que su corriente asciende arrastrando las partículas producto de la perforación hasta la superficie, al salir estas por la boca del pozo, esto solo es un polvo.

Espumantes. Están constituidos por detergente, agua y aire, se emplean con equipos neumáticos para la perforación de materiales masivos o altamente cohesivos, en los cuales el riesgo de derrumbes es muy bajo, aunque cumplen con las siguientes funciones:

1.- Reduce la cantidad de aire empleado durante el proceso de perforación, la espuma que se crea al bombear el aire se adhiere a los cortes y los hace subir, conforme este equipo va triturando las formaciones, los cortes son muy pequeños.

2.- Tiene un efecto que estabiliza las paredes, ya que produce una presión hidrostática hacia las mismas, sin embargo esta se pierde cuando el compresor interrumpe su funcionamiento y deja de bombear espumante.

3.- Sirve como refrigerante para las barrenas, debido a su función lubricante.

Lodos. Se utilizan: con equipos de percusión cuando el agua no alcanza a estabilizar las paredes de la perforación o el consumo de la misma es muy alto; con equipos rotatorios en la mayoría de los casos, excepto cuando se perforan materiales compactos que no provocan derrumbes y se pueden utilizar ya sea espumante o aire, ya que esto reduce el costo de los trabajos; de la misma manera se utilizan con el equipo neumático.

Estos se componen principalmente de arcilla y agua, la arcilla mas utilizada y conocida es la bentonita, ésta tiene la cualidad de absorber grandes cantidades de agua, y al ser disuelta en ésta, forma una emulsión viscosa, hasta formar un gel con una capacidad de hinchamiento de alrededor de 8.6 veces el volumen de los sólidos disueltos. Las funciones principales de los lodos son:

1.- *Extracción de los recortes del fondo del pozo a la superficie.* Esto depende de la densidad, viscosidad y la velocidad con que sube el lodo, ya sea entre la tubería y las paredes del pozo o por el interior de la tubería, de acuerdo al equipo de circulación directa o inversa respectivamente.

Las partículas sólidas suspendidas en el fluido circulante durante la perforación, tienden a hundirse, este hundimiento será mayor mientras mas grandes o densas sean; el lodo arrastrará los fragmentos cuyo hundimiento será menor que la velocidad de ascenso del lodo, sin embargo cuando el hundimiento sea mayor, será necesario utilizar un mineral pesado como la barita, el cual puede llegar a incrementar hasta en el doble la densidad del lodo. En condiciones de flujo turbulento la tendencia de hundimiento disminuye y una mayor cantidad de los detritos logran ser extraídos hasta la superficie, lo que no ocurre en caso de que el flujo sea uniforme, sin embargo, si el flujo es demasiado turbulento esto puede excavar y erosionar las paredes, produciendo derrumbes. No debe utilizarse un lodo muy viscoso y denso, ya que esto provoca que las partículas pequeñas no alcancen a sedimentar y regresen a la fosa de lodos para su reutilización.

2.- *Impermeabilización y enjarre de las paredes del pozo.* Sirve para evitar derrumbes de formaciones no consolidadas.

La impermeabilidad impide que las aguas de acuíferos entren en el pozo, lo cual podría provocar derrumbes en exceso. La perforación de rocas porosas presenta dos condiciones: una consiste en que si las aberturas en la roca son pequeñas se produce un enjarre adecuado, mientras que si las aberturas en la roca son bastante grandes se produce una pérdida de circulación del lodo, esto debido a que el lodo no pueden tapar dichas grietas, lo que provoca un costo muy alto por la pérdida del fluido. Se debe tener cuidado al utilizar lodos en la perforación de rocas, esto debido a que puede producir una impermeabilización que afecte el volumen de agua a extraer.

El enjarre es resultado del efecto de filtración del lodo, al penetrar éste en la formación, su espesor depende de la diferencia de presiones entre la columna de lodo y la del agua contenida en la formación. El enjarre deber ser delgado para permitir el paso de las herramientas de perforación, esto para asegurar la estabilidad en las paredes del pozo, si el enjarre es grueso puede causar que las herramientas queden aprisionadas durante la perforación, o cuando se termina esta y se realice la extracción de la barrena o la colocación de la tubería, puede provocar derrumbes de las paredes.

3.- *Refrigeración de la barrena.* Es esencial, ya que al girar la barrena, esto provoca una fricción, lo cual produce calentamientos y desgastes, la temperatura de la barrena depende de la velocidad con que gira y del peso de la sarta de perforación soportado por la barrena; el fluido absorbe el calor a través de su circulación y mientras menor sea el porcentaje de arena que contiene, su función será más efectiva.

4.- *Otras funciones consisten en:* lubricar la tubería de perforación, ya que el lodo evita que la tubería friccion directamente contra las paredes, ocasionando desgaste en ambos; la suspensión de los recortes, cuando se interrumpe la perforación; se debe verificar que el lodo no tenga agentes corrosivos o abrasivos, en caso de que los tenga la cantidad debe de ser mínima, para evitar que el equipo de perforación sufra deterioros.

Las propiedades principales para tener un buen control de calidad de los lodos son:

1.- *Densidad*. Esta varía de acuerdo a la cantidad de agua contenida y va de 1.08 a 1.38 gr/cc, sin embargo, adicionándole minerales como la barita esta puede llegar a una densidad de 2.3 gr/cc e incluso mayor.

2.- *Propiedades coloidales*. Son las que permiten que el lodo forme un buen enjarre y tenga una buena permeabilidad, esto depende de la calidad de la arcilla y su contenido en sales.

3.- *Potencial de hidrógeno (P. H.)*. Produce cambios en las propiedades físicas del lodo, tales como una resistencia gelatinosa y una acción corrosiva.

4.- *Contenido de sales y arenas*. Esto produce una gran pérdida de agua, enjarres gruesos y una disminución de la resistividad del lodo, esto último puede afectar los resultados del registro eléctrico;

Parte importante del uso de lodos es:

1.- *Dimensiones de las fosas*. Varían según la perforación, es recomendable que tengan una amplitud suficiente, tanto para el asentamiento de los cortes extraídos del pozo y que no es posible retirar en el curso del canal, como para mejorar la alimentación de la bomba. Se recomienda que la fosa de alimentación tenga por lo menos 3.00 por 2.00 por 1.5 metros de profundidad y la de sedimentación sea 0.50 metros más profunda.

2.- *Canal de retorno*. Debe tener una pendiente suave y su desarrollo debe ser tal, que permita retirar los cortes, antes de que estos lleguen a las fosas. Dichos cortes serán los que se utilizan para las muestras, para obtener las curvas granulométricas de las formaciones atravesadas.

3.- *Desazolve de las fosas*. Se debe efectuar con frecuencia, para evitar la acumulación de los cortes, ya que esto provoca el paso de los mismos a la fosa de alimentación y de aquí a la succión de la bomba, lo que le produce desgaste, bajo ninguna circunstancia se debe alimentar a la bomba de lodos desde la fosa de asentamiento.

b) Toma de muestras.

Durante el proceso de perforación se deben obtener muestras por duplicado de los materiales que se vayan encontrando en el curso del trabajo, las cuales se deben tomar en intervalos, en cada pozo esto varía, pero se realizan entre dos a cinco metros y otras adicionales en cada cambio de formación. Se obtienen de acuerdo al equipo de perforación:

1.- Al utilizar equipo de percusión, cuando se alcanza la profundidad de muestra, se limpia la perforación utilizando una cuchara de válvula plana (o la adecuada según el material perforado), hasta eliminar los residuos de los materiales cortados; posteriormente se introduce la línea de perforación en la cual se conecta un muestreador de barril, diseñado especialmente para la toma de muestras.

2.- Con el equipo percusor, se logra obtener la muestra, directamente perforando con la barrena y recuperando ésta con la cuchara de válvula plana. En formaciones

blandas se toma la muestra con la cuchara de válvula plana, la cual debe tener soldada en el fondo una zapata con filos revestidos con carburo de tungsteno.

3.- Cuando se utiliza equipo rotatorio de circulación directa o neumático, al llegar a la profundidad prefijada para la muestra, se interrumpirá la perforación; se circula fluido hasta que se desaloja el material cortado y el fluido sale limpio, se limpia el canal de retorno; posteriormente se perfora un tramo de 20 centímetros, nuevamente se circula fluido para desplazar el material cortado hacia el canal, donde se toma la muestra sin lavar (con residuos del fluido de perforación).

4.- Cuando se utiliza equipo rotatorio de circulación inversa, se sigue el procedimiento anterior, las muestras se recogen directamente de la descarga del retorno de circulación.

Las muestras se deben guardar en frascos de vidrio con capacidad de 250 cc, se deben etiquetar con el número de muestra y la profundidad a la que corresponden. Estas muestras se toman por duplicado, ya que unas se utilizan para formar el corte geológico definitivo, y las otras son empleadas para realizar el análisis granulométrico.

Corte geológico. Lo tiene que realizar un ingeniero geólogo en laboratorio para tener la certeza de la composición de las formaciones perforadas.

Para realizar el análisis granulométrico se agruparán las muestras en tramos de formaciones homogéneas, esto con la ayuda de la comparación del corte litológico y el registro eléctrico. Se debe tener cuidado en el análisis de las muestras por métodos estándar.

El método de cuarteo consiste en tomar una muestra seca de 500 a 1000 gramos en caso de materiales gruesos, de acuerdo a la experiencia de la S.A.R.H., mientras que en caso de arenas finas se deben utilizar aproximadamente 250 gramos, para evitar que los tamices de mallas finas se sobrecarguen. Ya seleccionada la muestra, se vierte ésta bien mezclada sobre una superficie lisa formando una pila en forma de cono, posteriormente se allana esta pila y se distribuye el material de tal manera que tome la forma de "torta", después se divide la "torta" por la mitad, a su vez cada mitad se divide en dos quedando cuatro partes, por último se retiran dos cuartas partes opuestas y se mezclan bien las dos restantes, esta es la muestra que se utilizará para el análisis granulométrico, en caso de que la muestra sea grande se repetirá el cuarteo.

Teniendo la muestra para el análisis, se seleccionan de cuatro a seis tamices con una serie de aberturas de diferentes mallas, las cuales separan la muestra en varios tamaños de partículas, la malla de mayor abertura no debe retener más del 20% de la muestra.

En la tabla No. 3.1 se sugieren tres agrupaciones de tamices para: arena fina, arena gruesa y grava. Esta tabla indica el tamaño de la abertura en pulgadas y el número de mallas por pulgada cuadrada.

Para realizar la curva granulométrica los tamices se colocan quedando el de mayor abertura en la parte superior y el de menor abertura en la parte inferior y en la base la charola, se pesa la muestra seca y se vierte en el tamiz superior, como los tamices forman una pila, el material va pasando por entre los tamices, esto cuando al conjunto se

le imprime un movimiento circular vibratorio, entre los tamices queda retenido material, el cual se pesa y se hace una relación entre el tamiz y el porcentaje retenido acumulado; iniciando con el tamiz superior, para terminar con el peso de material retenido a la charola, el peso acumulado debe coincidir con el peso original de la muestra.

Arena Fina	Arena Gruesa	Arena y Grava
0.023" (28 mallas)	0.046" (14 mallas)	0.131" (6 mallas)
0.016" (35 mallas)	0.033" (20 mallas)	0.093" (8 mallas)
0.012" (48 mallas)	0.023" (28 mallas)	0.065" (10 mallas)
0.008" (65 mallas)	0.016" (35 mallas)	0.046" (14 mallas)
0.006" (100 mallas)	0.012" (48 mallas)	0.033" (20 mallas)
CHAROLA	0.008" (65 mallas)	0.023" (28 mallas)
	CHAROLA	0.016" (35 mallas)
		0.012" (48 mallas)
	CHAROLA	

TABLA No. 3.1 AGRUPACIONES DE TAMICES PARA DETERMINAR ARENAS Y GRAVAS.

La gráfica se realiza ordenando en el eje de las ordenadas el porcentaje de material retenido acumulado y en el eje de las abscisas la abertura en pulgadas, con la unión de los puntos se traza una curva que muestra la distribución de los tamaños de los granos que contiene la muestra, desde los gruesos hasta los finos, viendo la gráfica de derecha a izquierda. En la gráfica cuando se determina un tamaño de partícula, este indica un porcentaje, el cual nos sirve como referencia.

Los acuíferos de mayor productividad en general, son los que se encuentran en los depósitos de arenas y gravas, su curva granulométrica define si el estrato perforado es un depósito de este tipo. En la figura 3.13, se muestran cuatro gráficas de arenas y gravas. Cuando al realizar la curva granulométrica de las muestras obtenidas de una perforación, se tenga una distribución similar a las gráficas de la figura, se toman en consideración los valores de la tabla No. 3.2, donde se presentan las aberturas de cedazo comercial y el filtro de grava, calculados de acuerdo a las curvas de estos materiales, según la S.A.R.H.

Tipo de material	Arena fina	Arena fina y gruesa	Arena gruesa	Arena y grava fina
Cedazo comercial	1/8"	3/16"	3/16"	1/4"
Filtro de grava	1/4" a 1/2"	1/4" a 1/2"	1/4" a 3/4"	1/2" a 3/4"

TABLA No. 3.2 RECOMENDACIONES DE LA S.A.R.H. PARA SELECCIONAR CEDAZO Y FILTRO DE ACUERDO A LA GRANULOMETRÍA DE LAS FORMACIONES PERFORADAS.

La elaboración de las curvas granulométricas de los materiales perforados, se realiza hasta que se concluyó la perforación del pozo.

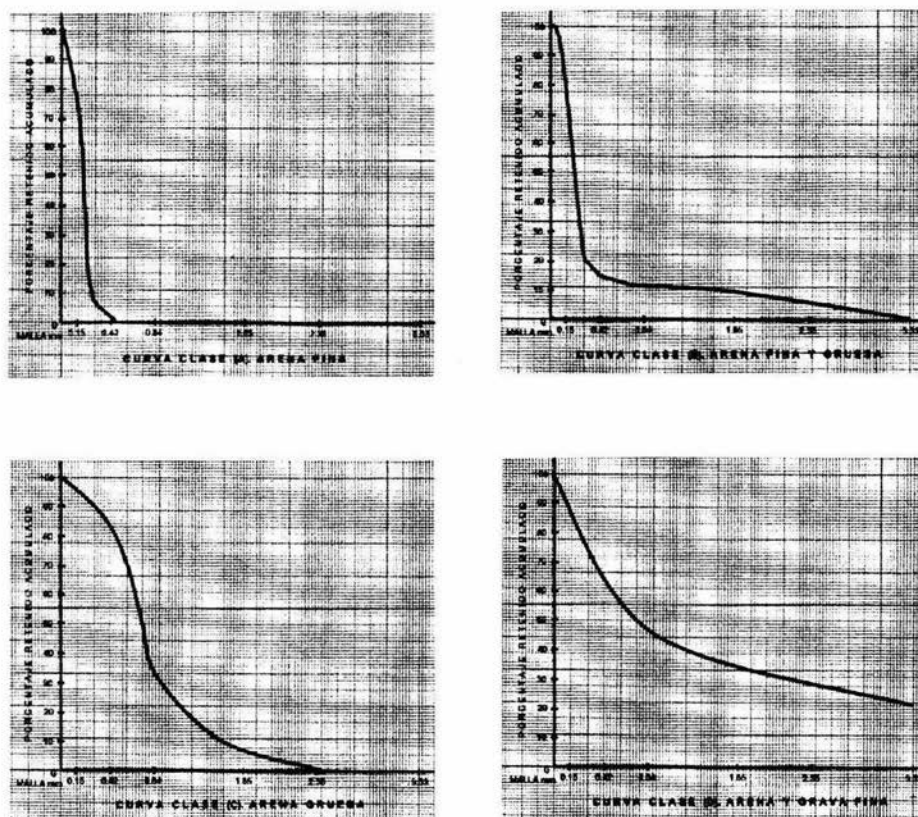


FIGURA 3.13 GRÁFICAS DE GRANULOMETRÍA DE ARENAS Y GRAVAS.

c) Corrida del registro eléctrico.

La corrida del registro eléctrico, se efectúa durante la perforación, cuando se sospeche de la existencia de acuíferos salinos o contaminados, para realizar trabajos de cementación que impidan el flujo de dichos acuíferos. Al concluir la perforación se debe realizar una última corrida del registro eléctrico, para corroborar los datos del corte geológico, los espesores de las formaciones, la probable deducción de su porosidad y su permeabilidad; así como para saber cuales son los acuíferos aprovechables para la explotación.

La corrida del registro obtiene dos gráficas: una de potencial natural o espontáneo y otra de resistividad aparente, ambos en función de la profundidad, esta gráfica se obtiene, introduciendo uno (o varios) electrodos en la perforación, a medida que baja, indica una diferencia de potencial a través de las formaciones de estudio, mismas que

tienen una mayor o menor resistencia al paso de una corriente eléctrica. La gráfica se realiza colocando el potencial del lado izquierdo y la resistividad del derecho.

Potencial natural o espontáneo. Se mide por medio de dos electrodos conectados a un voltímetro, uno de los cuales es introducido al pozo mediante un cable aislado y el otro se coloca en la superficie, generalmente en la fosa de lodos, cuyo potencial debe ser constante, de tal forma, que para cada posición del electrodo en el pozo, el voltímetro marca la diferencia entre el potencial correspondiente al nivel de cada formación y el electrodo de tierra; esta diferencia de potencial se gráfica en el carril izquierdo del registro eléctrico y varía de acuerdo con el desplazamiento del electrodo a lo largo del pozo.

La curva de potencial es un índice de la permeabilidad de las formaciones, ya que para generar el potencial, debe existir un medio poroso, en el cual los poros están comunicados entre sí, además, que manifiesten la presencia de fluidos. Los materiales impermeables como las arcillas y lutitas, en la curva de potencial, se manifiestan por su poca o escasa variación, dando por resultado una línea casi vertical denominada "línea de las lutitas o de referencia", y se utiliza para valorar el potencial natural de las diferentes formaciones registradas.

Las variaciones de potencial se manifiestan por una serie de deflexiones hacia la derecha o izquierda (teniendo como base la línea de referencia), de estas, lo importante son sus amplitudes, no sus valores absolutos; por lo que el carril correspondiente carece de cero en la escala y sólo se proporciona el valor de cada división en milivoltios, así como los sentidos positivos y negativos. Los sentidos están colocados, siempre el negativo hacia la izquierda y el positivos hacia la derecha, el negativo indica casi siempre formaciones porosas, en tanto que el positivo manifiesta formaciones impermeables tales como arcillas, lutitas, arenisca, etc.

Cuando el fluido de la perforación es más dulce que el agua de la formación, el potencial natural resulta negativo, siendo esta la relación más usual; suele ocurrir en areniscas con agua salada, las cuales siempre contienen algo de agua intersticial. Cuando el fluido de perforación es más salado que el agua de la formación, las deflexiones del potencial natural son positivas, como frecuentemente se observa en arenas con agua dulce. Por último, si la salinidad del lodo de perforación es igual a la de la formación no se observa ninguna variación de potencial.

Resistividad aparente. Es la resistencia de una unidad de volumen y se mide en ohms, siendo el cubo la unidad de volumen (un metro cúbico), por lo que la resistividad se expresa en ohms-metro; en tales circunstancias, una formación de 10 ohms de resistividad tiene una resistencia de 10 ohms de corriente por cada metro cúbico de formación.

La curva de resistividad se obtiene al introducir dentro del pozo uno o varios electrodos, desde los cuales la corriente eléctrica penetra y circula en las formaciones; el recorrido que tiene dicha corriente no está sometido a ninguna restricción más que a la ubicación de él o los electrodos; por lo tanto las mediciones son afectadas no sólo por la capa situada a nivel del electrodo, sino también por la columna de lodo y por el diámetro del pozo; se debe tener en consideración que en cuanto mayor es el diámetro, se afecta más la medida de la resistividad (sobre todo si se usa un sistema de un solo electrodo, el cual generalmente es utilizado en los pozos de agua).

La curva de la resistividad se grafica en el carril derecho del registro eléctrico, a diferencia de la curva de potencial, en ésta si existe un cero en la escala que permite determinar el valor de la curva.

Los valores de la resistividad que se consignan en un registro eléctrico, generalmente son diferentes de los verdaderos, por lo que a dichos valores se les denomina de "resistividad aparente", exceptuando el caso de pozos con diámetro pequeño y acuífero o acuíferos de alta capacidad productora en los que resistividad aparente es casi igual a la resistividad verdadera. La corrección de la resistividad la realiza el personal especializado que efectúa el registro, en la tabla No. 3.3 se muestran algunos valores de la resistividad.

Arenas y gravas conteniendo agua dulce	30 a 200 Ohms-m
Arenas y gravas conteniendo agua salobre	4 a 30 Ohms-m
Arenas y gravas conteniendo agua salada	0.1 a 4 Ohms-m
Arenisca y calizas conteniendo agua dulce	50 a 500 Ohms-m
Agua potable	10 a 100 Ohms-m
Formaciones compactas	1000 a 10000 Ohms-m
Arcillas y lutitas	2 a 10 Ohms-m
Lodo de perforación	1 a 10 Ohms-m
TABLA No. 3.3. RESISTIVIDADES DE ACUÍFEROS Y DE REFERENCIA PARA EL REGISTRO ELÉCTRICO.	

De acuerdo a los datos anteriores, se aprecia que los acuíferos con agua de buena calidad y las formaciones compactas, tienen mayor resistividad que las formaciones arcillosas, de lutitas o que los acuíferos con agua salada.

En la exploración de las aguas subterráneas se acostumbra utilizar el equipo de un solo electrodo, por lo sencillo y económico del sistema; además de que los resultados obtenidos son confiables. En la figura 3.14 se aprecia la instalación del equipo.

Para la obtención de las curvas de potencial y resistividad con el equipo antes mencionado, se hace descender el electrodo "A" al interior del pozo, mientras que el electrodo "B" se coloca en tierra, generalmente en una fosa de lodos, ambos electrodos están conectados al equipo registrador. Conforme el electrodo se desplaza dentro del pozo, este va captando las variaciones de potencial y resistividad, las cuales son registradas automáticamente en el equipo registrador. Para que estas lecturas puedan efectuarse, se necesita que la perforación no se encuentre ademada; además debe contener lodo para facilitar el contacto eléctrico con las formaciones perforadas.

En la práctica, el potencial y la resistividad de un tipo de formación determinada, varía dentro de ciertos límites, según las características de: la salinidad del lodo y del agua de los acuíferos; la permeabilidad del estrato, formaciones con características similares y de la velocidad con que se corre el registro.

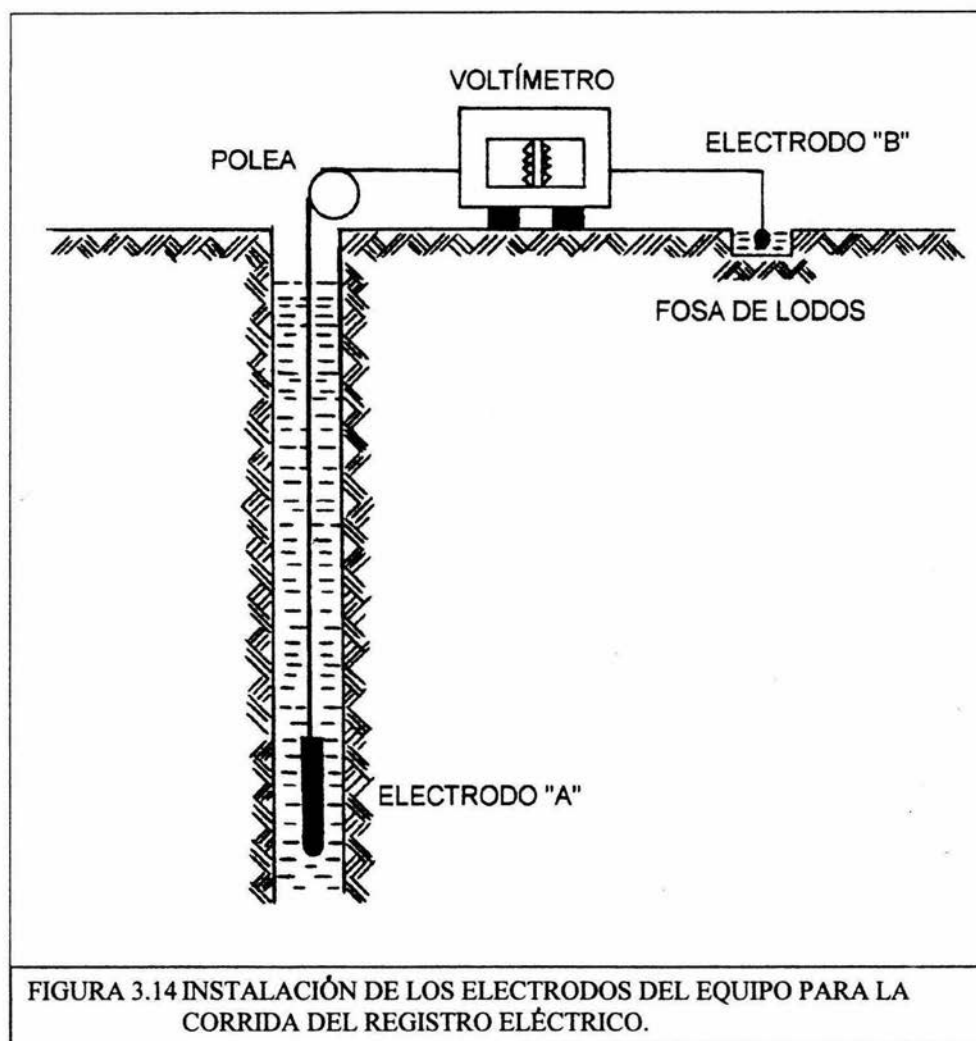


FIGURA 3.14 INSTALACIÓN DE LOS ELECTRODOS DEL EQUIPO PARA LA CORRIDA DEL REGISTRO ELÉCTRICO.

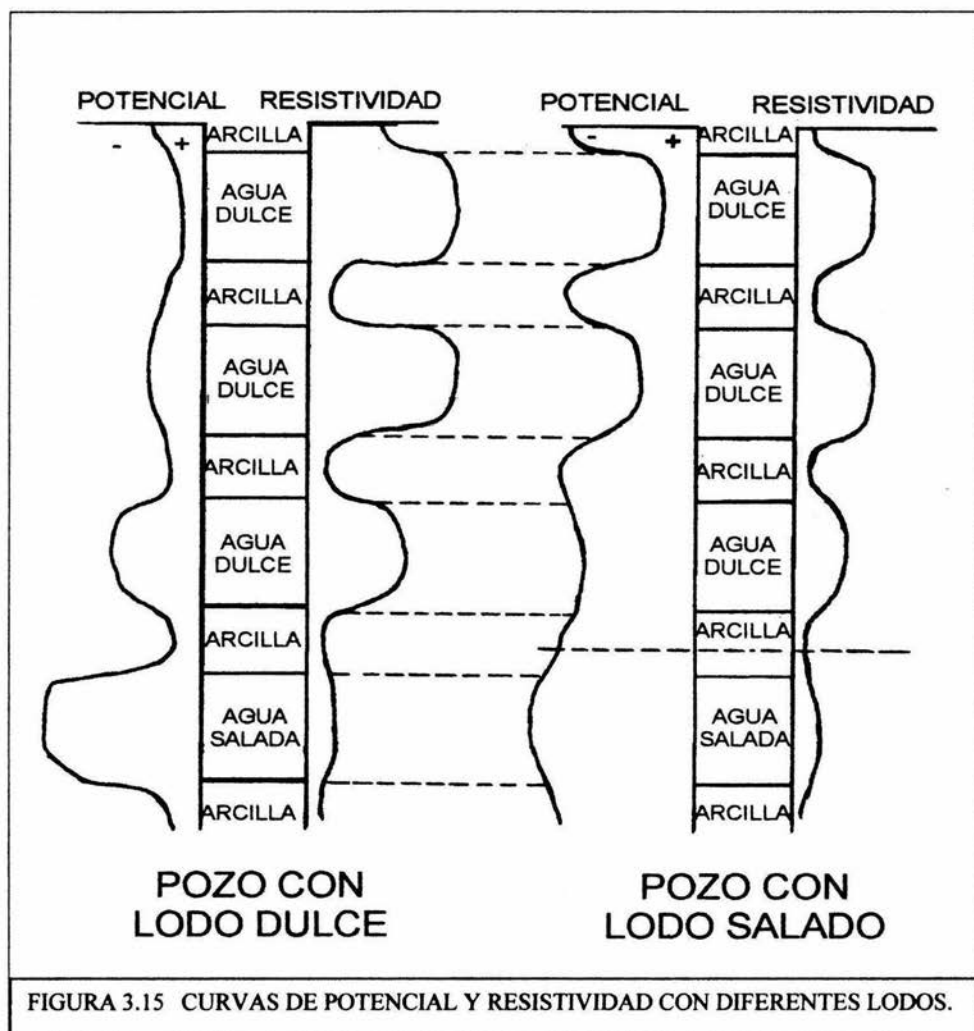
Efecto de la salinidad del lodo y del agua de los acuíferos. Es un factor importante, debido a que si el lodo de perforación es salino, este es un mejor conductor que el agua dulce; por lo tanto, el agua de la formación entre más pura sea, más alta será la resistividad del acuífero; al igual el potencial de la formación será mayor en sentido positivo que el potencial de las arcillas. Con relación a los registros eléctricos, siempre es necesario medir el potencial en la fosa de lodos, es recomendable que el lodo de perforación sea poco salino, además se debe conocer la resistividad del lodo para poder efectuar una correcta interpretación:

1.- Si el acuífero y el lodo de perforación tienen la misma salinidad, el potencial del acuífero es generalmente pequeño, con respecto al potencial de las arcillas, pudiéndose manifestar como positivo o negativo.

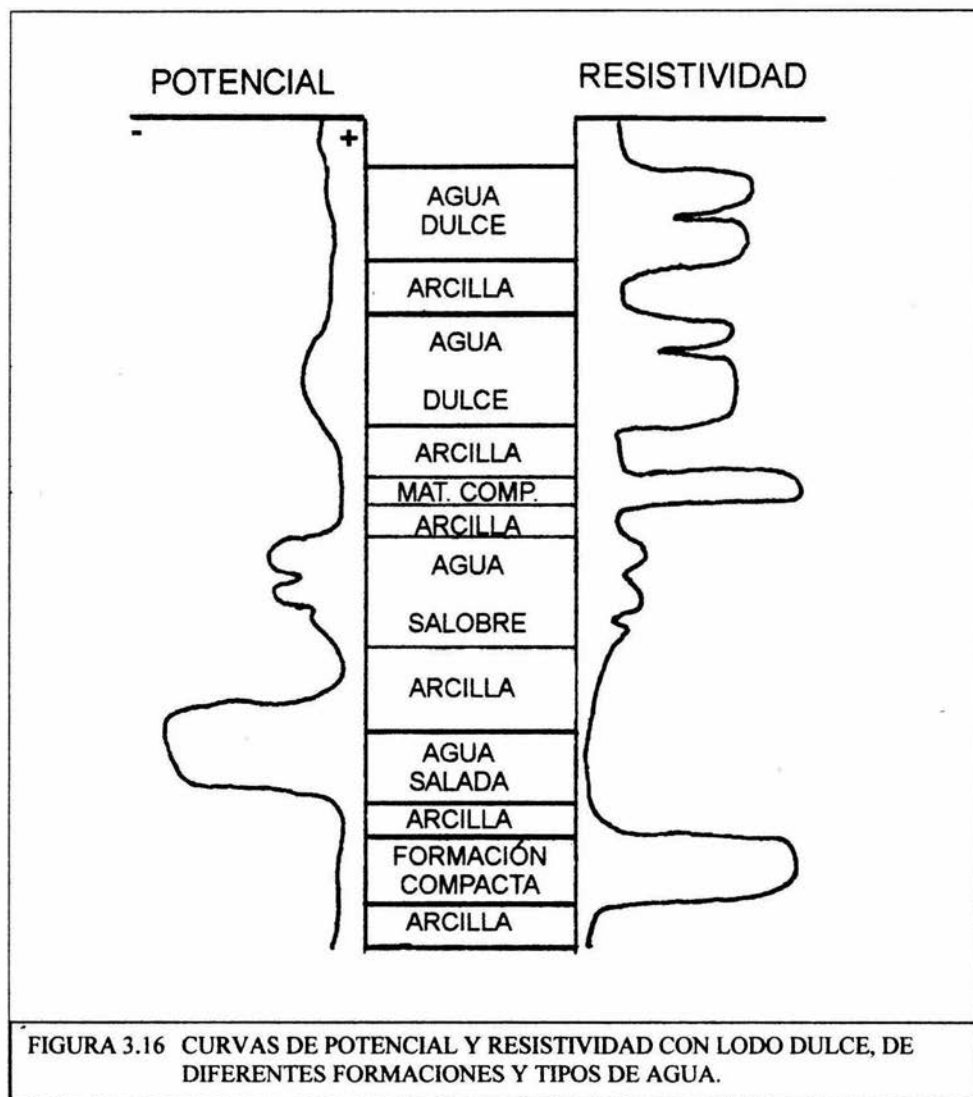
2.- Si el acuífero es de mayor grado de salinidad que el lodo de perforación, el potencial de la formación es por lo general mayor en sentido negativo que el potencial en las arcillas, tendiendo la curva a desplazarse hacia de izquierda en cada formación que contenga aguas salobres o saladas.

3.- Si el lodo de perforación es más salino que el acuífero, el potencial de la formación se vuelve mayor en sentido positivo que el de las arcillas, tendiendo la curva a desplazarse hacia la derecha en cada formación que contenga agua dulce.

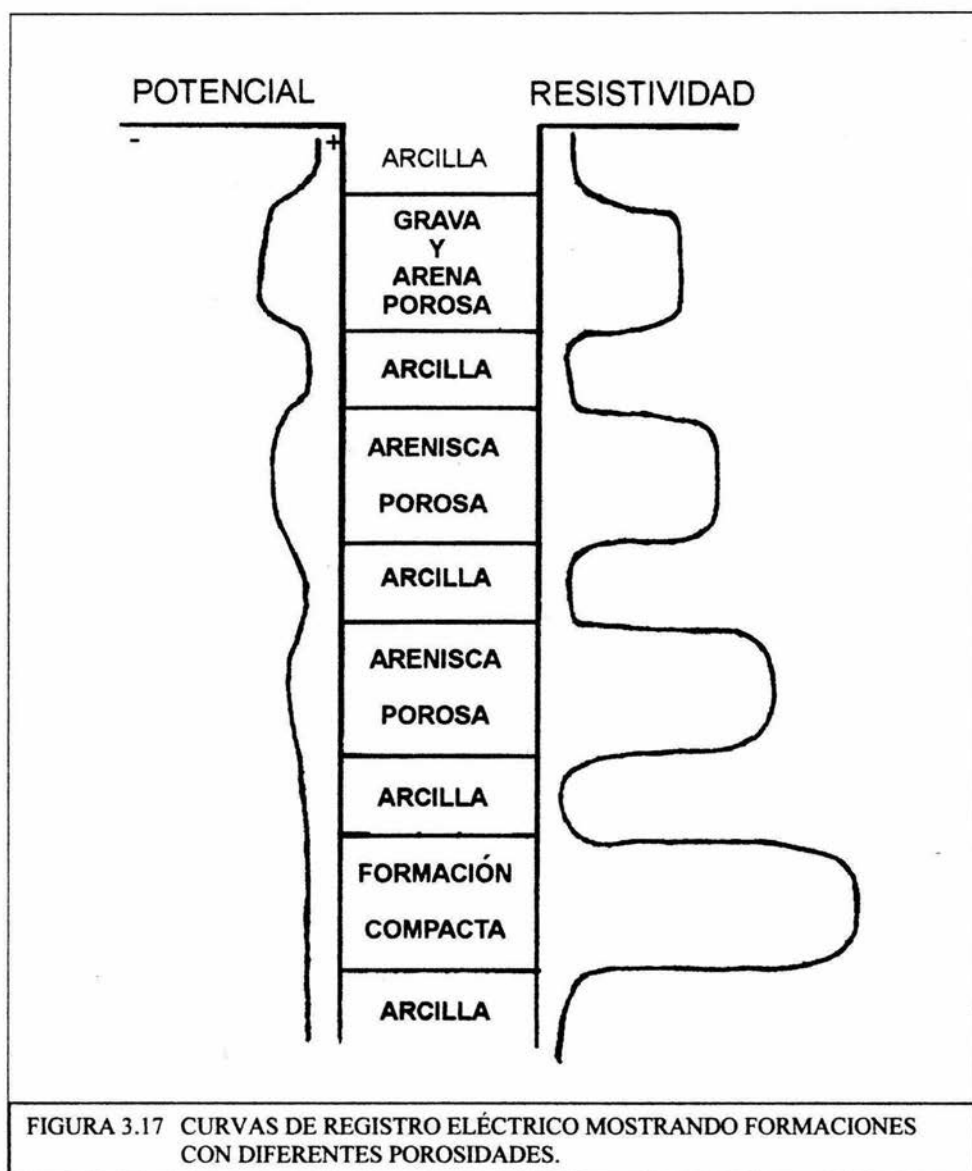
4.- En relación con la salinidad del lodo, la figura 3.15 muestra una perforación, en la cual se hace una comparación de las curvas de potencial y resistividad de la corrida de dos registros eléctricos, el primero con lodo dulce y el segundo con lodo salino.



5.- Si el fluido de perforación es dulce, la curva de potencial correspondiente a un acuífero con aguas aprovechables para uso y consumo humano, es positivo; pero si el lodo es salino por contaminación del agua, esta cambia a negativo, de acuerdo al contenido en sales; esto se aprecia en la figura 3.16.



Permeabilidad del estrato. En un acuífero, entre mayor es su porosidad, su resistividad es baja y su potencial es negativo con relación al de las arcillas; de este modo las arenas y gravas tendrán valores bajos de resistividad y potenciales menores, esto con respecto a las areniscas y calizas, que contienen aguas de igual calidad, lo anterior se aprecia en la figura 3.17.



Las arcillas generalmente tienen pequeña resistividad en relación con las formaciones que contienen aguas dulces, de este modo un acuífero con intercalaciones de arcilla, tendrá bajos valores de resistividad al compararse con otro sin arcilla, su potencial también es reducido, como se observa en la figura anterior.

Formaciones con características similares. Las formaciones someras de arena y grava no siempre se encuentran saturadas de agua, en este caso, la resistividad de la formación es más elevada que si la misma estuviera saturada; este incremento de

resistividad depende de la cantidad de agua que este contenida en los espacios intersticiales de la formación; a una menor saturación, corresponde una mayor resistividad. Cuando un acuífero esta completamente seco, su resistividad es aproximadamente igual a la de una formación más densa o compacta; por lo general el potencial eléctrico de una formación se reduce cuando la saturación de aguas decrece.

Las variaciones de la resistividad y potencial en el registro eléctrico, corresponden a cambios de formaciones o incluso cambios en las características de éstas; por tanto estas variaciones determinan la profundidad de los contactos, así como los cambios dentro de una formación, como su contenido de aguas y sales.

Cuando en determinada profundidad, existen dos formaciones con características eléctricas similares, el registro eléctrico no proporciona una información definitiva y completa de que tipo de formación se trata, por ejemplo es difícil distinguir en el registro si se trata de arena no saturada o de una formación compacta; sin embargo, la diferencia de formaciones se detecta fácilmente, cuando se cuenta con el registro de perforación, ya que la formación compacta (por ejemplo areniscas), es mucho más dura y difícil de perforar que una de arena. Un caso semejante se manifiesta con las arenas y gravas, ya que no es posible diferenciarlas en un registro, debido a que ambas tienen idénticas características eléctricas.

Velocidad con que se corre el registro eléctrico. Es un factor de suma importancia, ya que esto repercute principalmente en los valores de potencial natural, por lo tanto, si la velocidad es alta se pueden omitir características de las formaciones atravesadas, por lo que es recomendable que el registro se corra en una forma lenta y de ser posible en dos sentidos; primero de arriba hacia abajo y después de manera inversa, con lo cual se logra la comprobación de las curvas registradas, así como el ajuste de las escalas.

Al realizar la corrida del registro eléctrico no siempre se obtienen datos exactos y completos para el diseño de un pozo, es necesario recurrir a una correlación de estudios, con las pruebas de sondeo y las muestras obtenidas, para identificar con precisión las formaciones atravesadas.

El registro eléctrico da la oportunidad de verificar si las muestras de material extraídas durante la perforación corresponden a las profundidades registradas, ya que con estas se realiza el corte geológico.

Cuando se corre el registro a una profundidad, y resulta que la base de la perforación corresponde a un acuífero aprovechable, esto da un parámetro, para continuar con la perforación, hasta encontrar un estrato impermeable o formación indeseable (acuífero de agua no apta para el consumo humano).

3.3 COLOCACIÓN DE ADEME, CONTRA-ADEME Y CEMENTACIÓN.

Todos los pozos para alumbramiento de aguas subterráneas requieren ser ademados, esto para impedir derrumbes y caídas de las paredes de la formación o formaciones atravesadas, además de que muy frecuentemente, se necesita cementar para sellar: acuíferos indeseables, el brocal del pozo para evitar la contaminación y como tapón de fondo.

a) Tubería de ademe.

El ademe, además de impedir los derrumbes, forma una cámara de bombeo, para el equipo con que se explotará el pozo (esta cámara debe ser de tubo ciego), de manera que cuando se realice el bombeo, los tazones de la bomba no queden frente al acuífero, evitando la succión directa y por consiguiente el arenamiento, su diámetro esta en función del gasto por extraer.

La tubería de ademe debe estar perforada o ranurada en las zonas productoras que se encuentran frente a las formaciones acuíferas que se desean explotar, con objeto de dar paso al flujo al interior del pozo que se establece durante el bombeo. La tubería de ademe que se encuentra perforada es conocida con los nombres de: ranurada, cedazo o tubo filtro, según el tipo de perforación que se haya practicado sobre la misma.

Las tuberías no perforadas se conocen con el nombre de ciegas o lizas. En pozos destinados para fines de abastecimiento de agua potable y para usos domésticos, la parte superior de las tuberías de ademe debe ser lisa.

Los pozos en explotación presentan a lo largo del tiempo variaciones y descensos en sus niveles de bombeo, esto en virtud del origen y constitución geológica de los acuíferos, así como de la forma de explotación de los mismos; esto crea la necesidad de prever esos futuros abatimientos, por lo que el pozo se diseña con una cámara de bombeo adecuada a esas fluctuaciones. La profundidad hasta la cuál debe ser colocada la tubería lisa, es de 3 a 6 metros mayor del nivel dinámico.

Para instalar en un pozo las tuberías ciega y ranurada adecuadamente, es necesario conocer a detalle los antecedentes de la perforación, así como los registros eléctricos corridos en el pozo después de la perforación, por lo que es necesario tomar en cuenta los siguientes puntos:

1.- Durante la perforación se toman muestras del corte a diferentes profundidades ya sea del canal o de la cubeta sin lavar, estas se guardan en envases adecuados que se rotulan con una etiqueta indicando la profundidad a la que se tomó dicha muestra.

2.- Durante la ejecución de los trabajos se lleva un informe de perforación diario, donde se registran: profundidad, diámetro perforado, número de muestras tomadas, material atravesado, cambios de formación, tipo de barrena y el fluido de perforación si se utiliza equipo rotatorio; en caso de utilizar equipo de percusión, el tipo de cubeta, principalmente; de lo anterior se elabora un resumen de perforación anexando el equipo utilizado, los contratiempos, corridas de registro eléctrico, etc.

3.- Cuando se sospeche de la existencia de acuíferos de mala calidad, el residente o supervisor debe ordenar que se corran registros eléctricos o de otro tipo, los cuáles se interpretan basándose tanto en las curvas de caída de potencial y resistividad, así como en las muestras geológicas e informes de perforación, registrando la salinidad del lodo empleado, para corroborar o desechar dicha sospecha.

4.- Se debe tomar en cuenta, tanto la granulometría de las formaciones acuíferas como la de grava, en caso de utilizar filtro artificial para el pozo, en función de las cuáles se selecciona el tipo y las dimensiones de las aberturas de la tubería productora.

Con los puntos anteriores se hace una correlación de estudios, para indicar las formaciones acuíferas y diseñar la tubería productora, la cuál depende de los siguientes factores: longitud, área de infiltración y abertura, tanto para pozos con filtro natural, como artificial.

Longitud. Esta se fija en función de la porosidad, permeabilidad y espesor de los estratos productores.

La colocación de la tubería productora depende básicamente del abatimiento máximo disponible, espesor y estratificación del o los acuíferos productores. No es necesario que el cedazo cubra totalmente el espesor del acuífero para obtener la máxima producción del pozo.

En acuíferos confinados, el abatimiento de proyecto debe corresponder al desnivel entre el nivel piezométrico y un punto ubicado arriba de la cima del acuífero.

En formaciones homogéneas, la longitud del tubo del cedazo se selecciona entre 70% y 80% del espesor del acuífero, obteniéndose así entre 90% y 95% del gasto máximo disponible.

Los porcentajes que se aplican en función del espesor de los acuíferos, se establecen en la siguiente relación, para espesores conocidos:

1.- Para espesores menores de 10 metros el tubo de cedazo tendrá una longitud del 70% del espesor.

2.- Para espesores iguales o mayores de 10 metros pero menores de 20 metros la longitud del cedazo debe ser de un 75%.

3.- Para espesores iguales o mayores de 20 metros pero menores de 40 metros la longitud del cedazo será del 80%.

4.- Para espesores de 40 metros o mayores, el tubo del filtro será del 50% del espesor, siempre y cuando se satisfagan los requisitos del caudal específico.

En formaciones heterogéneas, el tubo productor se colocará frente a él o los estratos más permeables o productivos, y su longitud será igual al 90% o 100% de cada uno de los estratos aprovechables.

En acuíferos libres, el abatimiento de proyecto quedará definido por el desnivel disponible entre el nivel piezométrico y un punto situado arriba y próximo al borde superior de la tubería productora.

Cuando la formación es homogénea, la práctica ha demostrado que con un buen diseño, el tubo cedazo conviene ubicarlo en la parte inferior del acuífero, con una longitud entre un tercio y un medio de su espesor, tendiendo a ser mayor en tanto se quiera mejorar la eficiencia y obtener un elevado gasto específico.

Área de infiltración. Esta en función del gasto y la velocidad del agua a través de la tubería, la cual no debe ser mayor de 3 cm/seg para: minimizar las pérdidas por fricción en las aberturas, reducir la posibilidad de arrastre de finos y contrarrestar los fenómenos

de corrosión e incrustación de las aguas. El área de infiltración total y por tramo de tubo comercial, se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$A_T = \frac{Q}{V} \quad (\text{ecuación 3.5});$$

$$A_{TT} = \frac{A_T}{L_{TP}} (L_{TT}) \quad (\text{ecuación 3.6})$$

donde:

A_T = Área total de infiltración, en cm^2 .

Q = Gasto, en cm^3 / seg .

V = Velocidad máxima de infiltración, en cm / seg .

A_{TT} = Área de infiltración por tramo, en $cm^2 / tramo$.

L_{TP} = Longitud total de tubería productora, en m .

L_{TT} = Longitud de tramo de tubería; depende del fabricante, en $m / tramo$.

Abertura. Se selecciona para proteger el material de las formaciones alrededor del filtro, impidiendo el paso de finos al interior de este, ya sea con o sin el auxilio de un filtro artificial de grava.

En cuanto a las aberturas del cedazo, dependen directamente de la curva granulométrica de las formaciones acuíferas y de la calidad del agua; en caso de existir un filtro artificial, se debe conocer la granulometría de la grava del filtro.

En formaciones homogéneas, de arenas finas y gruesas, las aberturas del tubo se fijarán para el tamaño del material que retenga un 30% del acumulado, cuando el agua es excesivamente incrustante; el 40% si es extremadamente corrosiva; el 50% si es ligeramente corrosiva, y del 40% al 50% si es ligeramente incrustante o el acuífero es delgado y colinda con formaciones de materiales finos no consolidados, o bien si el tiempo que dure el desarrollo es limitado.

En formaciones homogéneas de arenas y gravas gruesas, una abertura correcta corresponde al 35% del material retenido acumulado.

En formaciones homogéneas de arenas finas y uniformes en general, se justifica el diseño de pozos con filtro de grava artificial; sin embargo, en algunos casos, y cuando el proyecto lo amerite, se selecciona una abertura entre el 40% y 50% del material retenido acumulado.

En tubo de cedazo tipo rejilla se recomienda que tenga aberturas mínimas de 0.25 mm (N° 10) y 0.50 mm (N° 20), para aguas extremadamente corrosivas e incrustantes, respectivamente; si esta condición no se logra, es necesaria la colocación de un filtro artificial.

En formaciones heterogéneas, la abertura se selecciona aplicando el criterio de las formaciones homogéneas. Cuando una formación de material fino se encuentre sobre material grueso, el tubo cedazo, con abertura para material fino, debe penetrar un metro por lo menos en la formación del material grueso, y la abertura correspondiente a la formación de material grueso, será menor o igual a dos veces la del material fino.

Si la formación requiere la colocación de un filtro de grava, entonces la abertura será menor que dos veces el tamaño del material retenido, para las aberturas antes mencionadas, es decir:

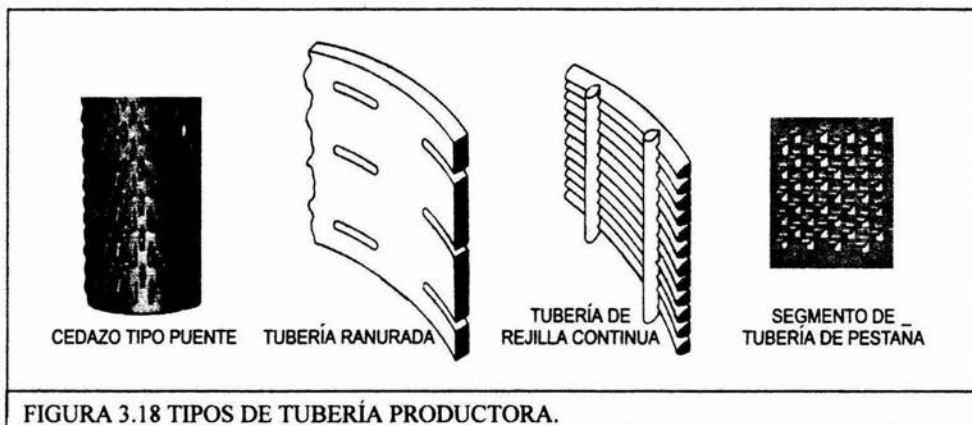
$$A_c < 2 TG_r \quad (\text{ecuación 3.7})$$

donde:

A_c = Abertura de cedazo, en *mm*.

TG_r = Tamaño del material retenido por el filtro, en *mm*.

En nuestro país se utilizan cuatro tipos de tubería productora: de cedazo tipo puente, ranurada, de rejilla continua y de pestaña, como se muestran en la figura.



Tubería de cedazo tipo puente. Esta se utiliza en pozos con profundidades menores de 80 metros, debido a que su espesor es delgado, la altura del puente es la que se adapta al tamaño de la partícula de la formación o filtro.

Tubería ranurada. Se fabrica en espesores anchos y es el más utilizado en pozos con profundidades mayores de 80 metros, debido a su mayor resistencia, las ranuras pueden estar horizontales, verticales o diagonales.

Tubería de rejilla continua. Se utiliza en pozos con un gran volumen de agua por explotar, la cual se encuentra en acuíferos delgados, por lo que el área de filtración debe ser la máxima.

Tubería de pestaña. Se emplea para perforaciones grandes, la pestaña se corta por tres lados y el cuarto se dobla con un ángulo de 60° , para que las partículas del filtro o formación solo se depositen en las esquinas y bordes de las pestañas.

Toda tubería productora ya sea ranurada, de cedazo o de cualquier otro tipo; debe adquirirse directamente de fábrica, se debe evitar el empleo de tuberías ranuradas con soplete, debido a que proporciona áreas de infiltración muy reducidas con demérito en la productividad del pozo en el cual se instalen, provocando una velocidad de infiltración del agua mayor a 3 cm/seg.

La tubería productora se fabrica con diferentes metales y aleaciones, para contrarrestar los minerales del agua, como se muestra en la tabla No. 5.

La tubería productora también se fabrica en P.V.C. de alta densidad, el cual tiene la ventaja de su inalterabilidad por la corrosión y la incrustación, aunado a un precio inferior respecto a las metálicas. Sin embargo su resistencia mecánica es menor, por lo que es peligroso su uso en ademes para pozos de más de 250 metros. Este tipo de tubería normalmente se utiliza ranurada, debido a que es relativamente fácil su elaboración.

Metal o aleación	Composición Nominal	Costo relativo	Aplicaciones
MONEL	70% níquel 30% cobre	1.5	Altos contenidos de cloruro de sodio combinado con oxígeno disuelto. No se utiliza generalmente en agua subterránea potable.
ACERO INOXIDABLE	74% acero 18% cromo 8% níquel	1.0	Presencia de sulfuro de hidrógeno, oxígeno disuelto, bióxido de carbono y bacterias ferruginosas. Presenta alta resistencia mecánica.
EVEDUR	96% cobre 3% sílice 1% manganeso	1.0	Aguas de alta dureza total, alto cloruro de sodio, sin oxígeno disuelto, alto contenido de hierro. Muy resistente a tratamientos con ácido.
BRONCE ROJO AL SILICIO	83% cobre 16% zinc 1% sílice	0.9	Condiciones similares a las del EVEDUR pero inferior en calidad y resistencia.
HIERRO ARMCO	99.84% hierro puro con doble galvanizado	0.6	No es resistente a una corrosión intensa. Se utiliza para pozos agrícolas en zonas de agua relativamente neutras.
ACERO	99.35% a 99.72% hierro 0.09% a 0.15% carbono 0.20% a 0.50% manganeso	0.5	No es resistente a la corrosión, por lo que en países desarrollados se emplea básicamente en pozos de prueba o de drenaje. No obstante puede alcanzar una larga vida útil si las aguas no son corrosivas ni incrustantes.

TABLA No. 3.4 ALEACIONES CON QUE SE FABRICA LA TUBERÍA PRODUCTORA.

La forma de unión de los ademes metálicos son: atornillado mediante rosca y cople, cople soldado o de soldadura eléctrica a tope con doble cordón.

La unión atornillada se observa en la figura 3.19.

La soldadura eléctrica a tope con doble cordón, es el sistema más utilizado, el problema más frecuente se deriva de la necesidad de suspender la tubería, durante la operación de ademado, de una flecha que atraviesa el ademe a través de las perforaciones practicadas transversalmente al tubo, esto se aprecia en la figura 3.19. Una vez soldados los tubos consecutivos, se retira la flecha del inferior y se cierran las

perforaciones con el mismo trozo de tubería que previamente se había cortado, posteriormente se baja este tramo de tubería al interior del pozo. Es importante supervisar el trabajo de soldadura con que se unen estas tapas, para evitar problemas y gastos adicionales.

Otros problemas frecuentes en este tipo de uniones de ademe, estriba en tubos: con la boca deformada por golpes o rolado defectuoso, sin biselar o tubos previamente cortados con soplete, de bordes irregulares, además el biselado debe tener un ángulo de 30° . Cualquiera de estas circunstancias impiden una correcta soldadura de los tubos, evidentemente, esta condición implica una unión defectuosa, que provoca severos problemas durante el funcionamiento del pozo.

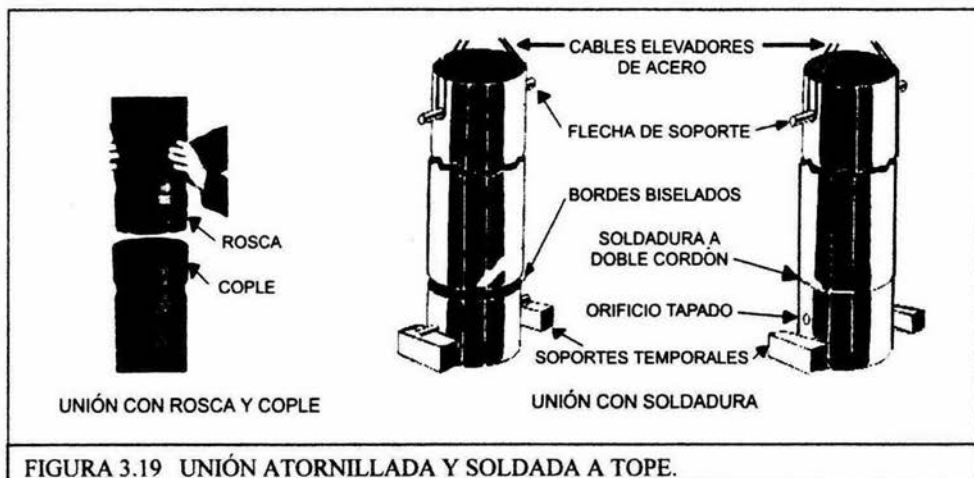


FIGURA 3.19 UNIÓN ATORNILLADA Y SOLDADA A TOPE.

b) Tubería de contra-ademe.

Las tuberías de contra-ademe son lisas, se emplean en los trabajos de perforación para impedir los derrumbes de las formaciones que constituyen las paredes de la horadación, en este caso pueden tener carácter provisional o definitivo, dependiendo de las posibilidades y conveniencia económica de su rescate.

En algunos casos se hace necesario el uso de contra-ademe para el confinamiento de acuíferos o formaciones que requieren aislarse por medio de cementaciones, donde se programa su instalación definitiva en el pozo. En cuanto a las normas de fabricación y colocación, los contra-ademes deben cumplir las mismas que la tubería para ademe.

En otras situaciones, las formaciones superficiales son poco cohesivas, debido a esto resulta sumamente difícil controlar los derrumbes de las paredes de la perforación, mediante lodos de circulación, especialmente en formaciones de grano muy fino y cuando el espejo freático se encuentra cerca de la superficie del terreno, ante tal eventualidad, se recurre a la instalación de tuberías de contra-ademe, perforando el estrato con un diámetro mayor del necesario, para instalar en él una tubería que tendrá la finalidad de servir como contra-ademe provisional, para de esta manera seguir perforando. A este contra-ademe se le conoce como conductor o contrapozo.

c) Cementación.

Se llama cementación a la colocación de lechada de cemento entre la tubería y las paredes de la perforación, se realiza para: sellar el brocal del pozo, sellar acuíferos indeseables y en el fondo del pozo, donde se denomina tapón de fondo.

Cementación en el brocal del pozo. Se realiza en perforaciones destinadas al alumbramiento de aguas subterráneas para fines de abastecimiento de agua potable y uso doméstico, en la parte superior de las tuberías de ademe (o de contra-ademe), como se muestra en la figura 3.20 con la finalidad de proteger los acuíferos contra la contaminación derivada de la percolación de aguas superficiales que se pudieran infiltrar, esto en formaciones superficiales permeables o de roca fracturada.

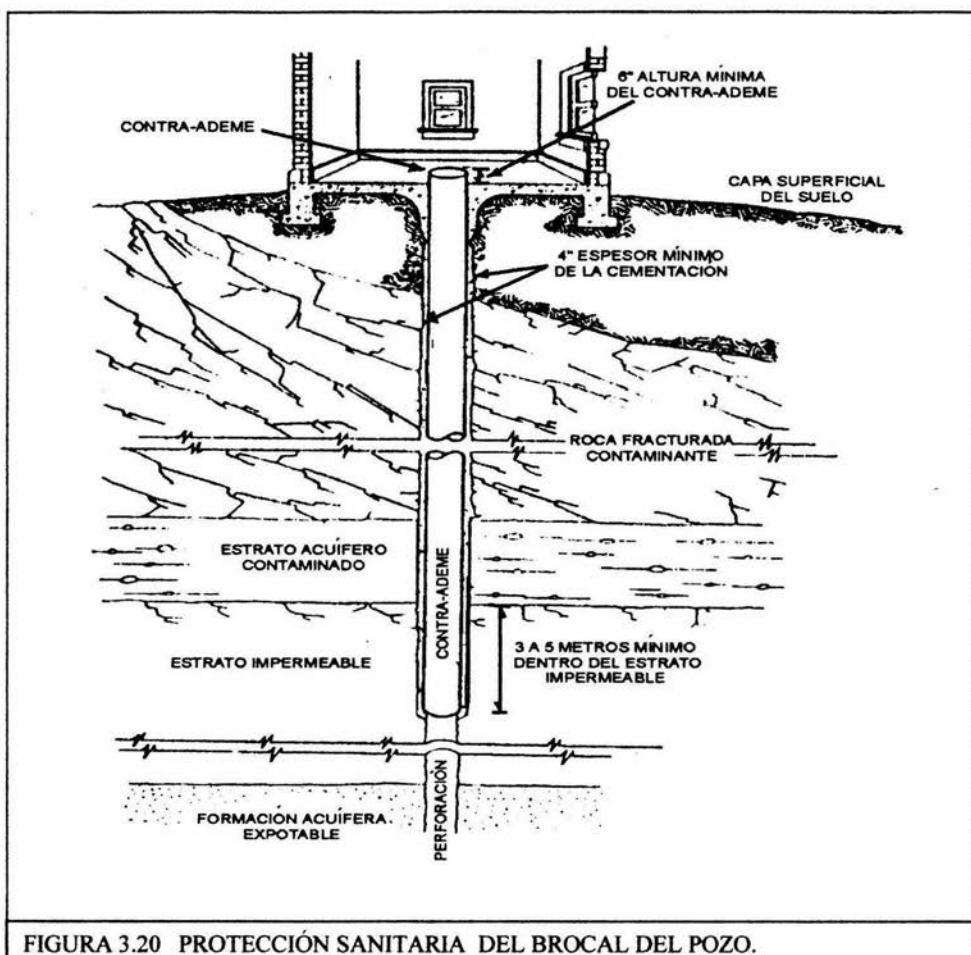


FIGURA 3.20 PROTECCIÓN SANITARIA DEL BROCAL DEL POZO.

Cuando la contaminación se limita a la parte superior del acuífero freático, la cementación debe llevarse hasta una profundidad de entre 3 y 6 metros, mayor que el abatimiento esperado en el pozo durante su explotación.

Cuando el acuífero contaminado esté confinado en su parte inferior por un estrato de material impermeable, la cementación será llevada hasta una profundidad de 3 a 5 metros abajo del nivel superior del estrato impermeable.

Cementación para sellar acuíferos indeseables. Si durante los trabajos de perforación se cruzan formaciones que contengan acuíferos de agua salada, o con contenido de materiales minerales u orgánicos no convenientes, las zonas del pozo frente a estos acuíferos deben ser cementadas, con el objeto de aislar los acuíferos de agua dulce o bien para evitar la contaminación de las formaciones que contengan agua de buena calidad factible de explotación.

Tapón de fondo. Se coloca para evitar los arenamientos originados por la turbulencia del bombeo, por el extremo inferior del ademe y forzar la entrada de los finos por las ranuras del cedazo durante el desarrollo. En este caso, en la porción inferior del ademe, se deposita una lechada agua-cemento cuyo volumen ocupará de 1.00 a 1.50 metros de dicha tubería, el colado se realiza en la superficie preferentemente, pero puede efectuarse dentro del pozo una vez colocada la tubería de ademe.

Otra función del tapón, consiste en aislar el acuífero del pozo, cuando en la parte inferior de este, existen acuíferos de agua salada o insalubre. La longitud del tapón depende de: la profundidad de perforación, si el estrato inferior es permeable o no y hasta donde se encuentra el estrato superior impermeable más próximo al fondo del pozo.

Por ningún motivo se soldarán placas de acero en el extremo de la tubería en lugar del tapón de cemento, debido a que impide la profundización del pozo, mientras que el tapón de cemento es fácilmente perforable.

Para lograr un buen trabajo de cementación es indispensable analizar cada uno de los siguientes factores: la correcta relación agua-cemento, las condiciones químicas de las formaciones que son atravesadas, la presión, la temperatura y la preparación de la zona del pozo donde se realice.

Relación agua-cemento. Se recomienda emplear lechadas con densidad de 1.80 a 1.90 gr/cm³, lo cual se logra con una cantidad de agua de 27 a 36 litros por cada saco de 50 kg. de cemento.

El cemento "común" requiere aproximadamente un 20% de su peso en agua, para lograr una hidratación completa, en pruebas de laboratorio se ha comprobado que necesita el doble de esta cantidad de agua para que la mezcla pueda ser bombeable. En ocasiones se usan lechadas gruesas utilizando poca cantidad de agua, estas mezclas ayudan a desplazar el fluido de perforación, teniendo menor peligro de contaminación con el lodo. En otras ocasiones se prepara con un alto porcentaje de agua, hasta un 70%, la cual da resultados satisfactorios siempre y cuando tenga el tiempo de reposo suficiente para que fragüe.

Condiciones químicas de las formaciones que son atravesadas. La lechada durante su desplazamiento se encuentra sujeta a reacciones químicas, las cuales se originan al contaminarse con las aguas del subsuelo que contienen: sales disueltas, sales alcalinas, cloro, calcio, magnesio y azufre; también existen reacciones químicas debidas a la composición del cemento y la utilización de fluidos de perforación.

Sales disueltas (sodio). Éstas alteran las propiedades de la lechada y en casos extremos no logra fraguar.

Sales alcalinas. Al contaminar la lechada, influyen en el tiempo de fraguado y al quedar en contacto con ella, la cementación puede sufrir posteriormente cuarteaduras.

Las soluciones diluidas de: cloruros reducen el tiempo de fraguado, las de calcio y magnesio son más activas que las de sodio en estas condiciones; por el contrario, al contacto con soluciones sulfurosas en determinadas concentraciones, pueden retardar el tiempo de fraguado, así como pequeños porcentajes de las mismas pueden acelerarlo.

Composición del cemento. La falta de solidez en el cemento se debe a una expansión después de su fraguado, como resultado de una tardía recristalización de cal y magnesio libres en el cemento mismo, por esta razón, más del 5% de magnesio es considerado perjudicial en el cemento portland. Las fallas en las cementaciones ocasionadas por estas reacciones químicas pueden no ser apreciables en un principio, pero posteriormente presentan un desmoronamiento y hasta la desintegración del cemento, dando como resultado una cementación defectuosa.

Utilización de fluidos de perforación. Cuando la lechada se contamina con lodos, se reduce la resistencia del cemento, si al bombearse la lechada está en contacto directo con el lodo del pozo, puede ocurrir que parte de la lechada se contamine y debido a que su densidad es menor, no afecte al resto de la columna de cemento; sin embargo, puede suceder que las condiciones permitan su canalización entre el lodo, en estas circunstancias, el cemento contaminado queda falto de resistencia dando como resultado una mala cementación.

Presión. La acción de esta sobre la lechada, es un factor importante en el tiempo de fraguado del cemento; principalmente donde la columna hidrostática que actúa sobre el cemento, origina un aumento en la presión, de acuerdo con la profundidad, esto ocasiona pérdida de agua en la lechada, acelerando el tiempo de fraguado y aumentando su resistencia a la compresión.

Temperatura. Esta influye en el tiempo de fraguado del cemento, ya que aumenta con la profundidad del pozo, lo que puede originar problemas durante la cementación; ocasionando un fraguado prematuro de la lechada cuando se esté desplazando, originando una mala unión entre la tubería y las paredes de la perforación.

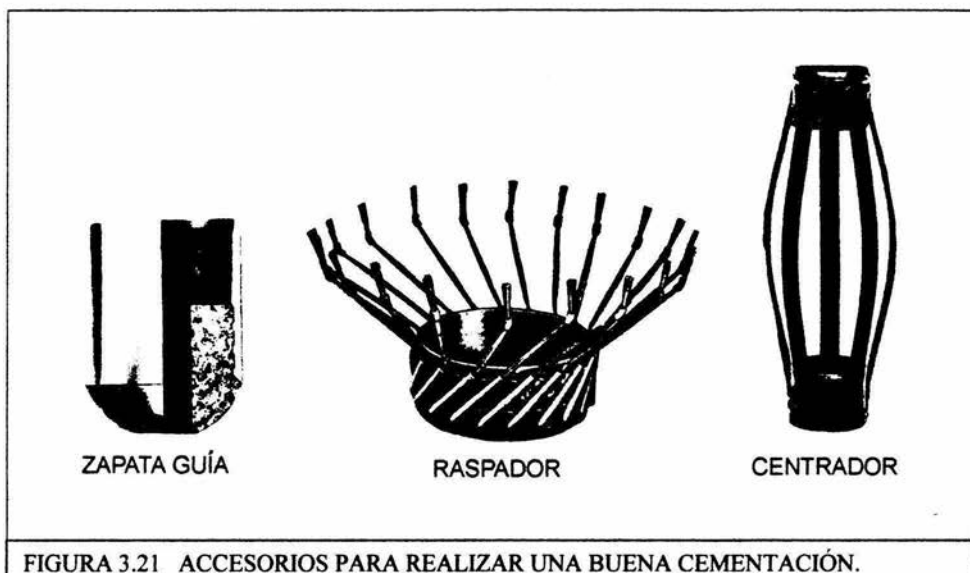
Preparación para realizar la cementación. Se prepara la tubería colocándole: una zapata guía, centradores y raspadores, estos se muestran en la figura 3.21; posteriormente se prepara la lechada.

Zapata guía. Se realiza con un tubo de longitud de 1.50 metros y diámetro igual al de la tubería de contra-ademe (para cementar el brocal del pozo o acuíferos salinos o insalubres) o ademe (para formar el tapón de fondo) por cementar, en este se colará un tapón de cemento de 60 cm, ya fraguada la lechada se le realiza una perforación al centro; o a una distancia de 20 cm se cortarán con soplete y en forma perimetral, de 6 a 8 secciones rectangulares de 10 por 4 cm y se utilizan para expulsar la lechada. Posteriormente este tramo de tubo se acopla en la base del ademe en la parte inferior de éste. La zapata además de guiar el extremo inferior de la tubería a través de las irregularidades que puedan existir en la horadación, sirve para permitir la circulación de la

lechada de cemento del interior al exterior de la tubería de ademe e impedir la circulación en sentido inverso, durante la realización de la cementación.

Centradores. Son unos flejes de acero en espiral, se deben adaptar a la tubería, para asegurar que ésta quede instalada en el centro de la perforación.

Raspadores o limpiadores. Son anillos de pared formados por alambres cortos y flexibles arreglados en plantillas verticales espirales o circulares, cuya separación entre cada uno de ellos no debe ser mayor de 9 metros. Tienen la función de limpiar las paredes del pozo, para desalojar el enjarre y permitir que la lechada entre en contacto directo con la formación, esto al ir bajando la tubería.



Preparación de la lechada. Se realiza de la siguiente manera: después de haber calculado el volumen en sacos de cemento, se colocan estos de tal manera que puedan ser fácilmente desplazados hasta una plataforma, la cual tiene en su parte central una cuchilla en forma de sierra para cortar los sacos al ser arrastrados hasta ella, permitiendo que el cemento caiga en una tolva o embudo, en cuyo extremo inferior se conecta una manguera que inyecta agua a presión, a fin de que esta a su paso, arrastre el cemento para formar la lechada, esta se deposita en una fosa donde se continúa su agitado, para posteriormente ser colocada entre el contra-ademe y las paredes de la perforación.

Los procedimientos de cementación dependen de la profundidad a la cual sea necesario realizarla; ya sea en el brocal del pozo, para sellar acuíferos indeseables a lo largo de la tubería o en el fondo del pozo. Tratándose de profundidades menores de 30 metros, esta se realiza: a fondo perdido, por el interior del contra-ademe, por inyección anular. En profundidades mayores a 30 metros se efectúa con una cabeza para cementar, por el interior del ademe, para asegurar una buena colocación.

Cementación a fondo perdido. Se realiza por gravedad, vaciando la lechada entre el ademe y las paredes de la perforación mediante baldes.

Cementación por el interior del contra-ademe. Se realiza en profundidades menores de 30 metros; por la parte inferior de la tubería, se baja una línea de inyección, como se observa en la figura 3.22; en el extremo inferior de esta o del tramo a ser cementado se coloca una zapata guía, que permita entrar a la lechada. En la parte inferior del contra-ademe se coloca un juego de empaques, armado de forma tal, que sea removido junto con la tubería de inyectado una vez terminada la cementación. Este juego de empaques debe evitar que la lechada penetre dentro del pozo, después de retirar la tubería de inyección, así mismo se controla el volumen en la zona de cementación.

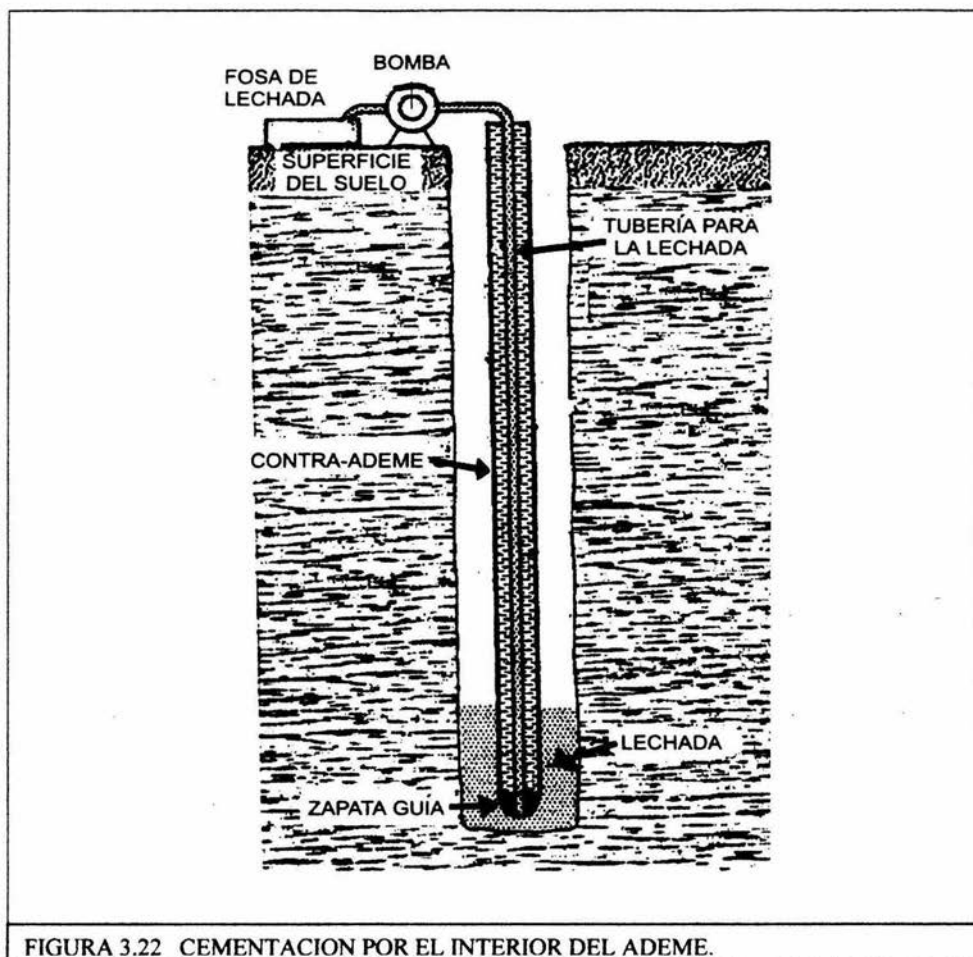


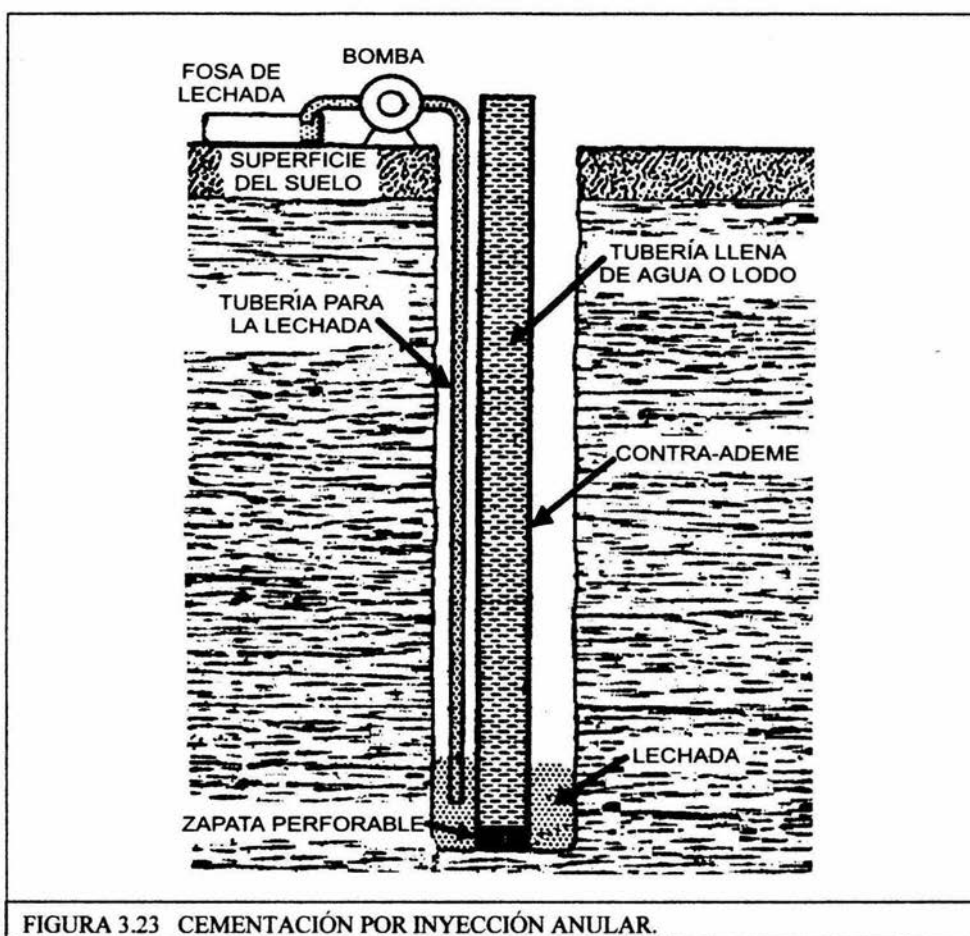
FIGURA 3.22 CEMENTACION POR EL INTERIOR DEL ADEME.

Mientras se realiza la cementación, el contra-ademe se mantiene suspendido (esto debido a que se utiliza la zapata perforada al centro, por lo que necesita estar por encima del fondo de la perforación) hasta que fragüe el cementante, en tanto, la lechada inyectada a presión penetra por el espacio comprendido entre el ademe y las paredes de la perforación, para lo que se emplea una bomba de tipo recíprocante. Una vez que el espacio por cementar se ha llenado, se desconecta la línea de inyectado del empaque inferior para efecto de rescatarla. El ademe puede mantenerse suspendido o soltarse

hasta el fondo del pozo, verificando siempre la verticalidad del mismo. Una vez logrado el fraguado (se acelera adicionando sal común a la lechada), se reanudan las operaciones de perforación, esto normalmente después de 48 horas, destruyendo el empaque inferior.

Cuando el pozo se perfora con máquina rotatoria de circulación directa que es el más común de los casos, la inyección se realiza en forma similar a la descrita en párrafos anteriores, salvo que la lechada se hace circular por la propia tubería de perforación con la bomba de lodos o por gravedad, garantizando el control de la cementación, al terminar esta, la bomba deberá lavarse para que sus partes no sean afectadas por la acción abrasiva de la lechada. Este procedimiento es similar al de la figura 3.22.

Cementación por inyección anular. Para realizarla debe existir un espacio entre tubería y contra-ademe para alojar un tubo de inyección de diámetro adecuado, el cual se recomienda de 38.1 mm (1 ½ ") a 50.8 mm (2") como mínimo; para que el trabajo cumpla con una buena calidad, el volumen de la lechada no debe tardar más de dos horas para ser bombeado y la maniobra de colocación debe ser de manera continua. La figura 3.23 muestra un esquema de este procedimiento.



Este procedimiento es el más conveniente, generalizado y satisfactorio. El extremo del tubo de inyección se debe bajar hasta la parte inferior del tramo por cementar, como se aprecia en la figura, se mantendrá sumergido en la lechada durante todo el tiempo que dure la cementación, recuperándolo gradualmente de manera lenta, para evitar derrumbes. Si se llega a suspender el inyectado, se tendrá que extraer la tubería totalmente y no se sumergirá de nuevo hasta que se haya desalojado totalmente el agua y/o aire de esta línea. La lechada se hace descender por bombeo o gravedad, siempre de manera continua; este método de colocación es apropiado hasta profundidades máximas de 30 metros, ya que cuanto mayor es la profundidad, se aumenta la probabilidad de derrumbes y la incertidumbre de que se este cementando desde el fondo de la perforación, así como de conocer el nivel de la lechada depositada.

En este procedimiento no es necesario suspender el contra-ademe, ya que este debe tener una zapata sellada, por lo que la tubería descansa en el fondo de la perforación. La zapata debe impedir el paso de la lechada hacia el interior de la tubería, incluso es adecuado que ésta este llena de agua o lodo, debido a la presión que ejerce la lechada al ser inyectada o vaciada por la tubería. Cuando se termina la cementación se debe verificar la verticalidad del contra-ademe, además para continuar con la perforación se debe esperar a que fragüe la lechada.

Cementación con una cabeza para cementar, en profundidades mayores a 30 metros. Se realiza por el interior de la tubería de ademe, mediante una bomba de desplazamiento positivo de gran potencia, mediante el siguiente procedimiento:

1.- Cuando la tubería que se va a cementar se encuentra en el fondo de la perforación se le conecta en su extremo superior, una cabeza para cementar previamente construida, que consiste en un tramo de tubería de acero del mismo diámetro y espesor que el de la tubería de contra ademe; una placa de acero de 19.05 mm (3/4") cuyo diámetro será 25.4 mm (1") mayor que el tubo, teniendo en su periferia ocho muescas equidistantes, que servirán para dar paso y fijar un número igual de tornillos, con cabezas en su base, para poder ser soldado al tubo; su longitud será tal que al estar en posición vertical puedan sobresalir por la tapa y se fijen fácilmente, mediante rondanas y tuercas, la tapa tendrá una asa al centro para su fácil movimiento. Soldado a una de las paredes de la cabeza de cementar irá soldado un niple y atomillado a este una válvula de paso, la cual se atornilla con la manguera de inyección. Entre la tapa y el tubo, se coloca una junta de plomo que sirve de empaque para evitar fugas. Ya instalada la cabeza se verifica la verticalidad de la tubería ya que esta se encuentra suspendida. Inmediatamente después, se circula agua limpia para que los materiales desprendidos por los raspadores, al hacer descender el contra-ademe; hayan sido expulsados quedando el pozo listo para su cementación.

2.- Antes de iniciar la cementación se coloca un tapón de madera de alrededor de 25.4 mm (1") de diámetro menor que el tubo y 76.2 mm (3") de espesor, el que llevará perfectamente adaptado a su parte central superior, un bloque de madera de sección cuadrada, de longitud mayor que el diámetro del tubo a fin de evitar el volteo; el espacio comprendido entre las paredes interiores del contra-ademe y el tapón de madera, será ocupado por un empaque de algún material sellante (que se deslice con facilidad como la grasa de alta viscosidad) que se fijará a las paredes del tapón. Inmediatamente después de terminar la inyección de la lechada, se levantará la tapa de la cabeza de cementar y se introducirá un tapón de madera similar al anterior, solo que con el bloque cuadrado adaptado a su parte central inferior.

3.- Para desplazar los tapones y la lechada contenida en el interior del tubo se volverá a colocar la tapa de la cabeza para cementar y a través de la bomba se inyecta lodo o agua, como el contra-ademe se encuentra suspendido, el tapón inferior está diseñado para que caiga y deje pasar la lechada, hasta que esta se derrame por la boca del pozo, lo que indica que ya está ocupado totalmente el espacio anular por cementar; sin embargo se sigue bombeando hasta que el tapón superior ha llegado al fondo de la tubería, entonces el manómetro de la bomba registrará un incremento de presión, mismo que se aprovechará cerrando bruscamente la válvula de paso, con el objeto de que la presión de la lechada no invierta la circulación y levante el tapón de madera antes de fraguar, se desconecta la manguera de inyección y se procede al lavado inmediato de la bomba. Se suspenden los trabajos por un lapso de 48 horas, para que el cemento fragüe, después, se despedazarán los tapones alojados en el fondo de la tubería de contra-ademe, para continuar con la perforación.

3.4 COLOCACIÓN DEL FILTRO.

Cuando los acuíferos proceden de formaciones aluviales, en las que son frecuentes los estratos de arcillas, arenas y gravas de diferentes tamaños, existe un porcentaje variable de granos finos, que durante el bombeo del pozo tienden a ser arrastrados hacia el interior del ademe, y posteriormente arrojados por la bomba; esto provoca daños al equipo de bombeo por la abrasión derivada de los sólidos bombeados; esto de manera frecuente provoca el fracaso del pozo, debido a la rotura o el aplastamiento de la tubería, derivado de derrumbes de las formaciones vecinas, que pueden llegar a dejar atrapado el equipo de bombeo.

Por lo anterior se deben adoptar medidas para impedir el arrastre de los sólidos, estas medidas deben ser: un cedazo debidamente proyectado al realizar el diseño del pozo o programar un espacio anular entre la tubería de ademe y las paredes de la perforación, capaz de permitir la formación de un filtro de grava, cuya función será la de controlar el arrastre de sólidos en suspensión durante el bombeo.

No se puede confiar el control del arrastre de sólidos a un cedazo debido a la finura en la gran mayoría de los casos de las formaciones o cuando se trate de arcillas, limos, arenas finas e incluso de formaciones intercaladas, de espesores delgados.

En ciertos casos las mismas formaciones establecen sus propios filtros de grava natural, durante la ejecución del desarrollo, pero esto es de forma muy eventual.

La mayor parte de los pozos en México han requerido filtro de grava, y en todos los casos en que se ha realizado correctamente el diseño y la colocación, no se han tenido problemas, en tanto que han fracasado muchos que no quedaron debidamente protegidos por un filtro.

Se debe tener presente que la grava debe estar formada por partículas redondeadas (con el objeto de tener la máxima permeabilidad), preferentemente de cuarzo, las que por su constitución no son fácilmente cementables. En su defecto se utilizarán gravas de río y arroyos, pero nunca producto de trituración, ya que las partículas se acuan entre sí produciendo una reducción de la porosidad y permeabilidad. Por otra parte la grava no debe tener materiales solubles.

El espacio anular que debe ocupar el filtro será mínimo de 76.2 mm (3"), para profundidades menores de 75 metros, mientras que para profundidades mayores aumentará hasta 152 mm (6"), esto por las dificultades durante su colocación. Los materiales seleccionados para el filtro deben revolverse previamente a su colocación. Su volumen será equivalente al teórico calculado más el 20%.

Cuando la perforación se ejecute con equipo rotatorio después de la colocación de la tubería de ademe y antes de iniciar el engravado se introducirá la tubería de perforación hasta el fondo del pozo, se procederá de inmediato a vaciar la grava a fondo perdido por el espacio anular existente entre el ademe y las paredes del cilindro perforado. La colocación deberá realizarse con palas de mano y en forma lenta para no provocar caídos de las paredes de la perforación. Durante la colocación se debe estar sondeando constantemente el espacio anular a fin de asegurarse que el filtro se va formando con continuidad. A medida que las gravas van bajando la tubería de perforación continua con la inyección de lodos, pero ya rebajados con agua, manteniendo el extremo de la tubería unos cuantos centímetros arriba del nivel de avance del engravado, para tratar de impedir derrumbes y caídos.

Si la perforación se realizó con equipo de percusión, al mismo tiempo que se vaya engravando el pozo (de la misma forma que para el equipo rotatorio), se extraen de él por medio de cuchareo los finos que se vayan introduciendo. Durante este proceso debe sondearse el pozo para verificar el nivel de las gravas.

Una vez que el espacio anular ha sido totalmente ocupado para eliminar "puentes" y formar correctamente el filtro, es indispensable agitar el pozo. Esto se efectúa mediante el empleo de un émbolo, o aire comprimido.

El pistón se mueve en el pozo de abajo hacia arriba empezando por el fondo, en tramos de 10 metros. Y en periodos de una hora, hasta alcanzar el nivel estático o el nivel inferior de la tubería lisa.

Cuando se emplea aire comprimido la operación se realiza utilizando dos tuberías; una de inyección y otra de descarga, debiendo tener ambas la misma longitud y como única condición, que al encontrarse sumergidas dentro del agua del pozo, la capacidad de la fuente de aire comprimido sea lo suficientemente capaz para que provoque el arrastre de los materiales que se encuentran en el interior del pozo. Iniciada la operación, 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; continuando este procedimiento hasta llegar al contacto de la tubería ranurada con la tubería lisa.

IV. TERMINACIÓN DEL POZO.

La terminación considera los procesos que se llevan a cabo después de construido el pozo, para asegurar una buena explotación del agua, estos procesos incluyen: la limpieza de lodos, en caso de que haya sido necesario el uso de este tipo de fluidos, la cuál se efectúa después de la colocación del filtro, con el equipo utilizado para la perforación; el desarrollo, es necesario para realizar la extracción de los finos que se encuentran en las inmediaciones del pozo, con equipo especializado y ayudar al acomodamiento del filtro artificial, en caso de que este no exista, formar un filtro con las formaciones perforadas. El aforo se efectúa, para realizar una correcta evaluación del gasto y del nivel de abatimiento, para seleccionar el equipo de bombeo para la puesta en marcha permanente.

4.1 PROCEDIMIENTOS DE LAVADO PRIMARIO.

En las perforaciones es indispensable el empleo de fluidos, cuando se requiere de un estabilizador, para las paredes de la perforación, se utilizan lodos; formados por una mezcla de agua y arcilla, ya sea que se utilicen equipos rotatorios, de percusión o neumáticos. Las cantidades de arcilla empleadas en un pozo son muy variables e incluso aumentan en forma notable cuando los trabajos sufren retrasos, debido a descomposturas del equipo de perforación o irregularidades en los servicios de suministros. Entre mayor tiempo ocupen los trabajos de perforación, mayor será la cantidad de lodos, que se requerirá para impedir derrumbes y caídos.

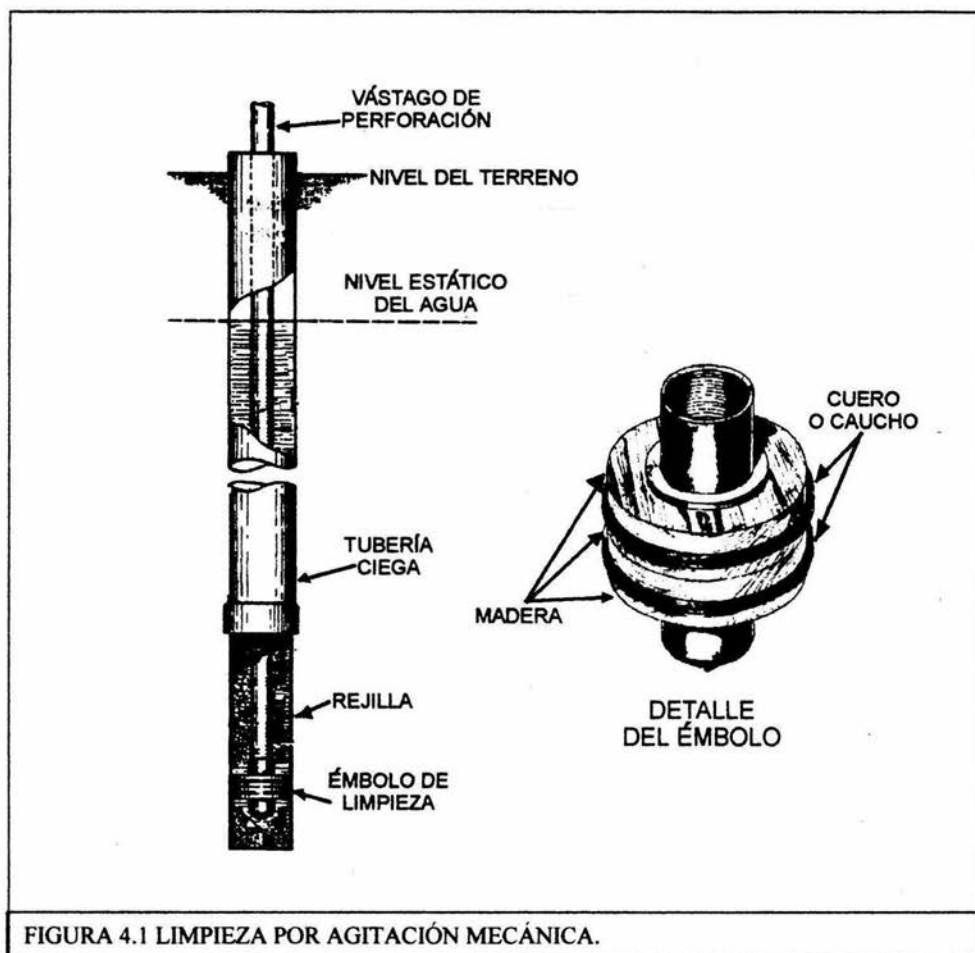
En la práctica, los lodos que se infiltran en las formaciones producen un alto grado de impermeabilidad, ya que provocan un taponamiento de las fisuras y grietas productoras. En cuanto mayor es la cantidad de lodos que penetran en las formaciones cruzadas durante la perforación, mayor será la impermeabilidad ocasionada en los acuíferos, en las vecindades del pozo; incluso debido a que la maniobra de engravado se realiza en plena circulación de lodos, el filtro suele quedar taponado o muy contaminado con estos, reduciéndose su permeabilidad ante la presencia del gel intersticial formado por las arcillas, con la consecuente reducción de la productividad del pozo.

Después de la construcción se realiza una limpieza cuidadosa, desazolve y desarrollo del mismo por medio de equipo especial, nunca se debe permitir que el equipo de perforación abandone el sitio del trabajo, sin antes haber realizado el lavado primario. El lavado primario se realiza después de la colocación del filtro, para dispersar cuanto antes los geles de lodo que se forman en los filtros y formaciones periféricas al pozo. De esta forma, la selección del método para efectuar el desarrollo será más apropiado. En el pozo que no se haya realizado un lavado con el equipo de perforación, lo más probable es que ni aún con tratamientos costosos de desarrollo, se logre rehabilitar totalmente la productividad correspondiente a la formación acuífera perforada; se obtendrán mejoras con los tratamientos, pero nunca se logra eliminar la acción impermeabilizante de los lodos de perforación al 100%, cuando no hayan sido removidos oportunamente.

El procedimiento de lavado primario depende del equipo que se haya utilizado para llevar a cabo la perforación: percusor, rotatorio y neumático.

a) Lavado primario con equipo de percusión tipo pulseta.

Cuando el pozo ha sido perforado con este equipo, la limpieza del pozo se realiza por medio de agitación mecánica, como se observa en la figura 4.1, este procedimiento aprovecha la propiedad del agua de ser incompresible, por lo que utilizando un émbolo formado por bloques de madera, entre los cuales van dos o tres empaques de hule o cuero, los cuales deben ser menores de 6.35 mm (1/4") a 12.70 mm (1/2") del diámetro interior del ademe del pozo, para evitar que se atore. En este proceso se realiza una enérgica agitación por medio del movimiento recíprocante impartido al pistón en su carrera ascendente y descendente; el movimiento ascendente del émbolo es accionado por medio de los tambores de la máquina perforadora, mientras que el descendente se logra adicionando un peso al émbolo, conectando uno o varios vástagos percusores, según sea necesario. Debe tenerse en cuenta que la carrera del émbolo, debe ser de una longitud máxima de 10 metros.



Se comprobará el tamaño correcto de los empaques del émbolo con respecto a las paredes del pozo, sin embargo, el hermetismo absoluto no se debe lograr, puesto que pone en peligro al equipo, en virtud de los intensos esfuerzos que esto causa; así como provocar un vacío que puede ocasionar el colapso en el ademe por el exceso de presiones.

Las fuerzas dinámicas recíprocas originadas por el émbolo, se convierten en un flujo y reflujo de ondas de compresión, éstas tienden a extraer las arcillas, y en general, los sólidos pequeños que contribuyen a la impermeabilización del filtro de grava y de las formaciones acuíferas.

Es conveniente que la carrera del émbolo inicie en el fondo del pozo y termine a la altura del nivel del espejo estático, el cual está localizado por encima de la zona de la tubería productora del ademe. Antes de iniciar la agitación mecánica se deben retirar los sedimentos que se encuentren en el fondo del pozo como: los lodos usados durante la perforación, las partículas que se hayan introducido durante la colocación del ademe y del filtro; durante la agitación también se sedimentan, lodos, arenas, gravillas, etc., éstas extraídas de las formaciones perforadas e incluso del filtro, por lo cual periódicamente es necesario desalojar los sedimentos del interior del pozo, por medio de una cuchara, con una válvula ya sea: de pie, de succión o de dardo; de las usualmente empleadas en los trabajos de perforación.

b) Lavado primario con equipo rotatorio.

Cuando la perforación se realiza con una máquina rotatoria, el procedimiento consiste, en montar la tubería de perforación conectada a la bomba de lodos, para bombear agua limpia, esta operación debe continuar ininterrumpidamente, hasta que por el brocal del pozo brote agua limpia, libre de sólidos y coloides en suspensión. El inicio del bombeo se realiza con la tubería colocada hasta el fondo, posteriormente se hace ascender conforme el agua brota limpia.

Debido a que el bombeo debe ser ininterrumpido, se requiere de una gran cantidad de agua, por lo que se debe contar con la suficiente; para condiciones normales, en cuatro horas se podrá realizar la operación; mientras que por tardado que sea el proceso no debe exceder a un turno de 8 horas. Este proceso se realiza para que el lodo no se endurezca mientras llega el equipo para realizar el desarrollo, ya que la bomba de lodos normalmente no tiene la potencia que el desarrollo requiere. Cuando la bomba de lodos que trae consigo el equipo rotatorio, tenga potencia y altura de succión suficiente para realizar el desarrollo del pozo, se realizará el aforo y con los datos obtenidos se selecciona el equipo de bombeo adecuado para la explotación.

c) Lavado primario con equipo neumático.

Cuando se utiliza el equipo neumático con una bomba de lodos, el procedimiento es igual al que se describió para el equipo rotatorio.

Si el equipo neumático viene equipado con compresor de capacidad mayor de 200 pies cúbicos por minuto, es conveniente realizar la limpieza bombeando aire por medio de la tubería de perforación, mientras que el propio ademe del pozo hace las veces de

tubería de descarga. La tubería de inyección se coloca de 5 a 10 metros bajo la cámara de bombeo, donde se inicia éste; al entrar el aire en contacto con el fluido de perforación forma una emulsión, la cual sube por la tubería del ademe brotando a la superficie; en un inicio dicha emulsión tendrá partículas de finos de las formaciones perforadas, conforme la emulsión se vaya limpiando, ira descendiendo el nivel de la tubería de inyección, hasta llegar al fondo de la perforación. Si la perforación se encuentra con una gran cantidad de lodos, el agua del acuífero es la que ayuda a desalojarlos. Este procedimiento es similar al desarrollo con equipo neumático, en el cual se utiliza un compresor específico, así como tuberías de inyección y descarga diseñadas para este fin, en el capítulo 4.3 este proceso se expone con mayor detalle.

4.2 SELECCIÓN DEL EQUIPO PARA EL DESARROLLO POR BOMBEO Y EL AFORO.

El desarrollo y aforo, bien sea para pozos con fines de abastecimiento o para irrigación, presentan una gran gama de caudales y niveles dinámicos, puesto que en pozos chicos de abastecimiento se requieren equipos de poca capacidad, en tanto que, en los grandes pozos para irrigación es necesario utilizar equipos muy grandes y costosos, haciendo que cada caso sea particular. El equipo debe cumplir con 130% del gasto de diseño, debido a que generalmente nunca se conocen "a priori" las características hidráulicas de los pozos.

Para cada caso en particular se debe seleccionar el equipo que resulte más adecuado, esto de acuerdo a la productividad y las características hidráulicas del pozo. Las bombas que se seleccionan, tienen cargas dinámicas muy grandes, debido a las especificaciones técnicas, donde se estipula que los equipos para desarrollar y aforar el pozo, deben extraer como mínimo un 30% más del gasto de explotación, con el objeto de garantizar un correcto desarrollo.

Los pozos con gastos reducidos, presentan fuertes abatimientos en los niveles dinámicos; mientras que, los pozos de gran productividad tienen niveles dinámicos poco profundos.

Debido a las diferencias en caudal y cargas dinámicas se recomienda el siguiente procedimiento:

1) Recurrir al catálogo de bombas turbinas para pozo profundo del fabricante, para obtener las curvas características de varias bombas, consultando de éstas los siguientes datos: diámetro de la bomba, el cuál debe ser menor que el de la cámara de bombeo; los caudales máximo y mínimo que se pueden bombear en l. p. s.; con estos datos se elabora una tabla, tratando de que los gastos se vayan escalonando como se observa a continuación.

Diámetro de la bomba	Caudal que se puede bombear en l. p. s.
6"	6 a 25
8"	15 a 35
10"	25 a 60
12"	80 a 200

TABLA No. 4.1 RELACIÓN DE DIÁMETRO DE BOMBAS CON CAUDAL QUE PUEDEN BOMBLEAR.

La tabla anterior toma como base toda la gama de casos que se puedan presentar. Cuando únicamente se trata de un caso en particular se busca dentro del catálogo de las curvas características, una con gasto de 130% a 150% del proyectado.

2) Con el gasto máximo (130% a 150%), se entra a las curvas características seleccionadas y se relaciona con la carga total en pies por paso, para definir el número de pasos y la carga efectiva de acuerdo a las necesidades mediante las siguientes expresiones:

$$N = \frac{H_T}{H_p} \quad (\text{ecuación 4.1});$$

$$H_E = N \cdot H_p \quad (\text{ecuación 4.2})$$

donde:

N = Número de pasos.

H_T = Carga total, en *metros de carga*.

H_p = Carga por paso, en *metros de carga*.

H_E = Carga efectiva, en *metros de carga*.

Como el número de pasos, rara vez es exacto, se redondea al próximo entero superior, con este dato se obtiene la carga efectiva.

3) Con la carga efectiva y el gasto máximo se calcula la potencia teórica necesaria del motor de combustión interna para hacer funcionar los impulsores de la bomba, mediante la siguiente expresión:

$$P = \frac{Q \cdot H_E}{76 \eta} \quad (\text{ecuación 4.3})$$

donde:

P = Potencia necesaria, en *H. P.*

Q = Gasto, en *l. p. s.*

H_E = Carga efectiva, en *metros de carga*.

η = Eficiencia, obtenida de las curvas características.

76 = Constante para obtener la potencia, en *H. P.*

Se recomienda utilizar la corriente eléctrica, en vez de motor de combustión interna, siempre y cuando se cumpla con la potencia necesaria en Kw, considerando que 1.0 H. P. = 745.701 Watt.

4) La potencia teórica se afecta por un factor de eficiencia, constituido por:

- Trabajo continuo del motor (es constante).
- Pérdidas por fricción en la columna de la bomba y la descarga (varían durante el desarrollo y aforo, debido a que el primero descarga el agua con finos, mientras que el segundo descarga el agua limpia).
- Pérdidas de eficiencia del equipo al operar a una altitud determinada (es constante).
- Pérdidas en transmisiones (es constante).

El total de las pérdidas se expresa en porcentaje y sirve para obtener la potencia real, para un óptimo funcionamiento del equipo.

4.3 DESARROLLO DE POZOS.

El lavado primario que se aplica a los pozos, solamente logra remover o extraer parte de las arcillas empleadas en la perforación; generalmente el pozo queda azolvado, y el filtro obstruido por los propios lodos y granos finos arrastrados de las formaciones, especialmente en estratos arenosos o de grano fino (limos y arcillas).

Los fluidos arcillosos empleados en la perforación, penetran profundamente en la formación a través de las paredes del pozo, causando una impermeabilización parcial. La arcilla tiene propiedades coloidales, y mezclada en cierta proporción con agua, forma una masa gelatinosa, que al penetrar por filtración entre las partículas de la formación, llega a formar una membrana; la cual es difícil de romper entre mayor sea el radio de penetración de lodos, en la periferia del pozo. La penetración de lodos en un pozo, varía de centímetros a metros, dependiendo de la permeabilidad de las formaciones y de la carga hidrostática de los propios lodos, de este modo las formaciones más permeables son las más afectadas por la contaminación. Entre tanto mayor sea la distancia radial de la contaminación, más difícil será conseguir la permeabilidad de la formación.

Con frecuencia, al terminarse un pozo, resulta que este es improductivo, o que su aprovechamiento es antieconómico, lo cual no corresponde a la riqueza del acuífero que se desea explotar. Esto se presenta en un elevado porcentaje de los pozos que anualmente se perforan; siendo este valor hasta de un 30%.

Dentro de la experiencia, es frecuente que los pozos perforados en formaciones acuíferas muy ricas, tengan caudales pobres, siendo esto ilógico. Analizando los reportes de esos casos, se encontró que los pozos no habían sido lavados oportunamente al terminarse el engravado, dando así tiempo a que los lodos de perforación realicen su acción impermeabilizante. Para reducir la impermeabilización provocada por los lodos, la mayoría de pozos se trataron mediante trabajos especiales como: aplicación de sustancias dispersoras de arcilla, inyección de aire, aplicación de hielo seco, etc.

Las maniobras de lavado del pozo, inician el desarrollo, solo en forma preliminar, por lo que el proceso se realiza empleando el equipo, de acuerdo a las necesidades de la perforación.

El desarrollo del pozo, es el conjunto de operaciones por medio de las cuales se logra un aumento en la porosidad y permeabilidad del filtro y de las formaciones acuíferas circunvecinas; desalojando los materiales finos y lodos de las formaciones, del mayor radio de las zonas periféricas del pozo; estas operaciones se continúan, hasta lograr un equilibrio dinámico en el flujo del agua y estático entre las partículas del filtro y las formaciones.

Durante el desarrollo ocurren descensos en el filtro, cuando existe uno artificial, para complementar la continuidad del mismo se engrava hasta la superficie cuantas veces sea necesario, esto para efectuar un acomodamiento, que indica que la estabilización total será mayor a medida que avanza el desarrollo del pozo.

Existen varios tratamientos para llevar a cabo el desarrollo de un pozo, estos son: químico, neumático y mecánico.

a) Desarrollo químico.

El tratamiento químico consiste esencialmente en la aplicación de productos químicos como: los dispersores de arcillas y el gas carbónico.

Dispersores de arcilla. Se aplican con el objeto de: limpiar las paredes del pozo, desprender el enjarre formado por los lodos de perforación y eliminar las arcillas de los conductos de las formaciones productoras; reduciendo la tensión superficial, permitiendo el paso de las aguas del acuífero a través de las paredes del pozo e incrementando la permeabilidad. La aplicación de los dispersores de arcilla es sencilla, ya que únicamente son vaciados a fondo perdido en el interior del pozo, en la cantidad recomendada por el fabricante, con el objeto de que la sustancia se mezcle con el agua. Entre estos se encuentran: el SC 100 y el ácido clorhídrico.

SC 100. Es un líquido que tiene la propiedad de dispersar arcillas, aumentando así la permeabilidad de las formaciones acuíferas circunvecinas del pozo; los fabricantes recomiendan que se utilice en cantidades del orden de 5 a 10 galones por cada 30 metros de profundidad del pozo y que se deje reposar de 3 a 7 días, con el objeto de que el dispersor penetre en las formaciones acuíferas selladas.

En la mayoría de los casos no basta con aplicar un dispersor, si se considera que la misma impermeabilidad que impide el flujo del agua, dificulta la penetración del dispersor hacia el interior del filtro de grava y las formaciones acuíferas que lo rodean, por lo que es necesario ejercer una acción dinámica vigorosa que facilite y active su penetración. En ocasiones esta acción se realiza con la misma bomba del aforo, cuando esta ya se encuentre instalada; si la bomba no se tiene a disposición, se podrá realizar una agitación mecánica, bombeo de aire o incluso con algún otro químico como el gas carbónico; con la finalidad de remover toda la capa sellada.

Ácido clorhídrico. Sirve para incrementar la permeabilidad en formaciones de calizas, depositando una cantidad de ácido de acuerdo al fabricante, en el interior del pozo, después de esto se debe producir una acción dinámica, durante una o dos horas, enseguida, se debe extraer el producto con una cuchara o por medio de una bomba turbina, hasta que el agua salga relativamente clara. Si después de realizar este procedimiento, el caudal obtenido es inferior al esperado, se repite la operación, usando un periodo mayor de agitación, antes de extraer el ácido. La extracción del ácido se realiza para evitar la reacción de corrosión que tiene el ácido sobre la tubería de ademe (y de contra-ademe en caso de que exista), además se deben agregar inhibidores de corrosión. Las ventajas de este procedimiento son:

- Mayor penetración del ácido en las calizas y consecuentemente mayor incremento en la porosidad y permeabilidad de la formación.
- Expulsión de los fluidos empleados en el tratamiento a velocidades mayores de las normales, produciendo una mejor estimulación del pozo.

Hielo seco o gas carbónico (CO₂). Se utiliza en estado sólido, al ser arrojado al interior del pozo, rápidamente se sublima pasando a un estado gaseoso, y aumentando

su volumen en unos cuantos minutos debido al cambio de temperatura que sufre (el volumen aumenta 900 veces aproximadamente), provocando con esto, presión dentro del pozo, la cual empuja a los finos hacia el interior de las formaciones.

El enorme volumen de gas sublimado no puede salir del interior del pozo en la misma proporción de su aumento, además de que la carga hidrostática del fondo del pozo, donde se realiza el cambio de estado (cuando menos la mayor parte del hielo seco arrojado); retarda notablemente su salida, por lo que el gas penetra en las formaciones circunvecinas del pozo, en virtud de la fuerte presión que se origina en la cámara gaseosa confinada por la columna de agua; el gas forma una emulsión con el agua, la cual avanza hacia los acuíferos, impulsada fuertemente por grandes cantidades del gas, al seguirse sublimando, ejerciéndose así una intensa acción dinámica en los espacios intergranulares del filtro de grava y formaciones vecinas.

La primera etapa del fenómeno termina cuando la columna de agua del pozo ha descendido, penetrando en los acuíferos en forma de emulsión, al culminarse esta, toda la emulsión agua-gas desplazada hacia los acuíferos origina un fuerte gradiente hidráulico hacia el pozo, invirtiéndose entonces la dirección del flujo. En un momento se llega a un estado de equilibrio instantáneo entre la presión ejercida por el gas y el gradiente hidráulico establecido en los acuíferos, a partir del cual, se establece un flujo cuya velocidad es constantemente acelerada, y en el curso de unos minutos no sólo llena el pozo con la emulsión que regresa de los acuíferos, sino que incluso, gran cantidad de dicha emulsión es arrojada a gran altura sobre el brocal del pozo, arrastrando consigo todos los sólidos de pequeña granulometría, arcillas, arenas, etc., que han sido removidas del filtro del pozo y de las formaciones acuíferas.

Cuando se arroja una fuerte carga de hielo seco, este fenómeno se repite varias veces con intervalos de unos cuantos minutos, a menos que se haya obturado el brocal del pozo por medio de una válvula, en cuyo caso se pueda regular la presión hasta la magnitud deseada, abriéndose la válvula en el momento conveniente para dar salida a la corriente ascendente que se inicia en el momento del cambio súbito de presión.

La experiencia, indica que es más conveniente la aplicación del hielo seco a cielo abierto, ya que el empleo de válvulas es una operación bastante molesta, en muchos casos no se cuenta con los elementos necesarios para la operación de esta última forma. Por otra parte, no existen evidencias de que un fuerte incremento en la presión confinada en un pozo mediante una válvula, tenga mejores resultados que los obtenidos con el sencillo procedimiento de arrojar una carga a cielo abierto, mientras que altas presiones tienen el inconveniente de alterar la estructura de las formaciones, lo que se manifiesta en grietas superficiales, que al tratarse de abastecimiento de agua potable resulta insalubre, debido a la contaminación superficial.

En una primera etapa, se deben arrojar de 3 a 5 cubos (de 60 a 100 kg.); cuando la cantidad de sólidos arrastrados por la expulsión de la emulsión provocada por la aplicación del hielo seco es abundante, se toman muestras para realizar un examen cualitativo y cuantitativo, que permita juzgar sobre la conveniencia o inutilidad de arrojar nuevas cargas para completar el desarrollo del pozo. Cuando sea necesario, se arroja una segunda carga de 100 kg., la que provoca un fenómeno más activo, confirmando o alejando las dudas de arrojar una tercera carga que va de 300 a 400 kg. Cuando el porcentaje de sólidos o coloides en suspensión sea muy reducido, es inútil continuar arrojando cargas de hielo seco.

Posterior a este tratamiento, se debe de dejar transcurrir un tiempo de reposo, después del cual se realiza la elección e instalación de una bomba de características apropiadas para realizar el aforo.

b) Desarrollo neumático.

El desarrollo neumático del pozo consiste en inyectar aire comprimido al interior de éste, por medio de una tubería conectada al tanque regulador de una compresora, para tal efecto, se hacen descender dos tuberías por el interior del ademe; por una se inyecta el aire y la otra funciona como tubería de descarga, por la cual, debido a que se forma una emulsión agua-aire, esta sale expulsada, arrastrando consigo gran cantidad de sólidos en suspensión. La acción dinámica es tan fuerte, que tiene la capacidad para sacar del fondo del pozo gravas de hasta 101.6 mm (4") de diámetro, e incluso mayores. Mientras la emulsión en la descarga sale con un elevado porcentaje de sólidos en suspensión, el volumen de agua será pequeño, lo que no justifica aumentar la capacidad de los compresores, puesto que al bombearse en un nivel, el caudal aumenta conforme el agua que sale en la descarga se va limpiando. El caudal extraído es del orden de 130% del esperado, ya que esto proporciona un óptimo desarrollo del pozo, esto en cuanto al reacondicionado del filtro y una extracción de finos y arenas de éste.

Cuando los trabajos son ejecutados con inyecciones de aire, la operación se inicia con las tuberías sumergidas de 5 a 10 metros del nivel estático del pozo, se hacen descender a medida que el agua bombeada brota limpia y libre de sólidos en suspensión, bombear agua limpia en un nivel, solo se justifica; cuando las tuberías llegan al fondo del pozo, donde se deben mantener en esa posición hasta que se haya bombeado cuando menos por una hora, a partir de entonces, se ascenderán las tuberías sin interrumpir la inyección de aire.

El compresor para gastos de 5 a 10 l. p. s. debe tener una capacidad de 250 pies cúbicos por minuto; mientras que para gastos más altos, es necesario un compresor de 500 pies cúbicos por minuto. Se debe tomar en cuenta la profundidad del pozo; ya que de ésta depende la de bombeo, por ejemplo un compresor estándar con una presión de trabajo de 125 lb/plg² solo desarrolla pozos con 88 metros de sumergencia, mientras que un compresor de alta presión de 250 lb/plg², desarrolla pozos de hasta 176 metros de sumergencia.

El equipo complementario para el desarrollo neumático consiste en: dos tuberías, una para inyectar el aire comprimido, la cual es de fierro galvanizado con coples, con diámetro de ¾" a 2 ½"; la segunda sirve como tubería de descarga o eductora, va de 2 ½" a 10" de diámetro, es recomendable que sea de acero con coples. Con frecuencia el contratista emplea tubería de aluminio, para hacerla ligera y facilitar las maniobras de colocación e izado. Estas tuberías se combinan de acuerdo con el diámetro del ademe; la tubería de inyección, se instala dentro o fuera de la eductora. El arreglo más adecuado consiste en instalar la tubería inyectora dentro de la eductora, cuando se instala fuera su extremo inferior debe estar provisto de un pequeño tramo de tubo de retorno insertado en la parte inferior de la tubería; sin embargo, se obtienen mejores resultados teniendo la parte inferior de la tubería inyectora multiperforada, para proporcionar mejor difusión de aire en el agua, obteniendo con esto una mezcla más homogénea. En conjunto ambas tuberías deben ocupar un diámetro muy cercano al del ademe, sin embargo, la tubería de

ademe puede funcionar como de descarga; teniendo cuidado con el volumen de aire inyectado, ya que éste influye en la velocidad de ascenso de la emulsión y por tanto en la sedimentación de arcillas, finos, etc.

c) Desarrollo mecánico.

El desarrollo mecánico es el más usual, debido a que, con la bomba que se realiza éste, se efectúa el aforo. Este procedimiento requiere de un equipo de bombeo compuesto de una bomba turbina de gran capacidad, accionada por un motor de combustión interna o electricidad, la bomba debe tener capacidad para cualquier gasto y nivel de bombeo que se llegue a presentar, los niveles dinámicos y caudales cambian constantemente en el curso del desarrollo. Al iniciar el desarrollo se obtiene un gasto muy reducido, el cual normalmente solo es una mezcla de arena sobresaturada con agua, pero en el curso del trabajo, conforme las formaciones y el filtro se van limpiando y adquiriendo permeabilidad, el gasto va en aumento, lo que hace disminuir los niveles dinámicos correspondientes.

Los equipos de bombeo para desarrollo, deben tener una capacidad del 30 al 50% mayor que la necesaria para bombear el gasto de proyecto, como se indicó anteriormente; la capacidad esta dada por las siguientes razones:

1) En la práctica, no se logra el desarrollo integral de un pozo, lo que suele llamarse desarrollo, es solamente relativo, ya que el pozo solo se desarrolla hasta un límite que parece satisfactorio, regido por el diámetro de la cámara de bombeo.

2) El desarrollo es un proceso, en el cual, durante las primeras horas o días del trabajo se tienen avances consistentes; sin embargo, en las últimas etapas, este es lento (ya que el agua tarda más tiempo en salir sin coloides ni sedimentos); para incrementar la productividad (aumentar las revoluciones por minuto, lo que proporciona un mayor gasto) se requiere cada vez de mayor tiempo. Para desarrollar al 100% un pozo se requiere de cientos de horas, lo cual no es práctico ni económico.

3) De acuerdo a la experiencia, se presenta un problema en muchos desarrollos, cuando se llega a un gasto límite, donde el operador no podrá aumentar la velocidad de la bomba, por no disponer de mayor potencia del motor, solo se podrá continuar con esta velocidad y en ocasiones se debe reducir. En este caso se puede llegar a una condición de estancamiento por falta de potencia en el equipo, frustrándose así muchos trabajos (teniéndose que recurrir a un equipo de mayor capacidad).

4) Un desarrollo es óptimo cuando se cuenta con un equipo de sobrada capacidad, por ejemplo: un pozo terminado, que puede rendir un gasto de 200 l. p. s. con un nivel de bombeo de 20 metros; si durante el curso del desarrollo se estaciona el bombeo en un gasto de 100 l. p. s., puede durar por tiempo indefinido con este gasto y con un nivel de bombeo de 30 metros sin ningún desarrollo adicional, mientras que si se eleva la velocidad de bombeo, el gasto irá en aumento, presentándose una constante mejoría en el nivel dinámico, y aunque al principio se presentan arrastres de sólidos en suspensión, el desarrollo continuará, y en el transcurso de unas horas, se podrá llegar a los 200 l. p. s.

5) Si un pozo se desarrolla a un caudal determinado, la experiencia aconseja que la explotación definitiva sea realizada con un gasto inferior, para que el pozo quede a salvo de riesgos derivados del arrastre de sólidos en suspensión. El desarrollo no se debe dar por terminado mientras el agua salga con sólidos en suspensión.

6) Cuando el gasto de explotación es igual al máximo que se obtuvo durante el desarrollo, resulta perjudicial para el equipo, debido a que el agua bombeada arrastrará sólidos en suspensión, lo cuál acarrea la abrasión y destrucción de los impulsores, tazones, flechas y otras partes de la bomba.

El desarrollo debe realizarse en un tiempo mínimo de 62 horas y 10 horas de aforo, de esta forma las horas de funcionamiento efectivo de la bomba de pozo profundo será de 72 horas. Se toman en cuenta el desarrollo y el aforo debido a que en este caso, ambos se realizan con el mismo equipo.

El desarrollo y el aforo en forma conjunta deben durar un mínimo de 72 horas, sin embargo, este trabajo se debe prolongar el tiempo necesario, hasta lograr un adecuado desarrollo. El desarrollo se deberá iniciar con el gasto mínimo que sea capaz de operar el equipo, posteriormente se incrementa por etapas, las cuales deben tener la duración necesaria hasta que el agua que se descarga sea limpia, libre de sólidos en suspensión. Los incrementos de las etapas serán por medio de la velocidad de la bomba, ya sea de 50 en 50 revoluciones por minuto, o de 100 en 100 revoluciones por minuto, según el comportamiento del pozo, hasta llegar al caudal máximo, el que una vez alcanzado se disminuirá utilizando los mismos rangos de velocidad.

En cada escalón antes de incrementar o disminuir la velocidad, se leen y anotan las lecturas del nivel de bombeo, del piezómetro y las revoluciones por minuto del motor utilizando para tal efecto un tacómetro (estos datos sirven para el aforo).

Cuando el motor se encuentre en su máximo escalón de velocidad, después de un lapso mayor del que le fue asignado y continúen saliendo finos, será conveniente golpear fuertemente la tubería de ademe en el brocal del pozo o acoplarle un vibrador para concreto; esto completa el tratamiento, destruyendo los posibles puentes (producto del engravado y lavado primario deficientes), propiciando un acomodo del filtro y de las formaciones circunvecinas; cuando existe un reacomodo del filtro al ser golpeado o vibrado el ademe, se deben reponer las gravas. El desarrollo se repite hasta eliminar la salida de finos.

Cualquier procedimiento que se utilice para desarrollar un pozo, deja en el fondo de éste un conjunto de sedimentos, los cuales siempre se deben sacar, ya sea con una cuchara, válvula de pie, de succión o de dardo; según las características de los sedimentos.

4.4 REALIZACIÓN DEL AFORO DEL POZO Y GRÁFICA GASTO-ABATIMIENTO.

La prueba de aforo es una operación que se realiza para determinar el caudal óptimo y nivel de operación del pozo. El objetivo de esta prueba es conocer el funcionamiento hidráulico del pozo y del acuífero, con el fin de explotar este último adecuadamente.

Con la prueba de aforo se obtiene la siguiente información:

- Determinación de la transmisividad del entorno del pozo y su gasto crítico.
- Pérdidas de carga en el pozo.
- Abatimiento del nivel estático en función del gasto.
- Eficiencia del pozo.
- Gasto óptimo de explotación.

Con el aforo se estudia el comportamiento del pozo, la predicción de caudales, tanto críticos como recomendables; para obtener los valores representativos de las características de los acuíferos (su comportamiento hidráulico), a partir de las condiciones del pozo, en su zona inmediata.

Con el aforo se construye la curva característica, aún cuando las pruebas de aforo no son costosas, deben tener una correcta planificación, para no cometer errores lamentables, que impidan su interpretación, ya que esto afecta la elección del equipo de bombeo que se debe instalar en el pozo.

Los resultados del aforo determinan las características de la explotación, por lo que es preciso, que el lugar cumpla con las siguientes condiciones (para facilitar, no solo la ejecución de la prueba, sino la correcta obtención e interpretación de datos):

1.- Hidrología subterránea:

- Que el acuífero sea homogéneo y responda a un modelo sencillo (libre o confinado).
- Que no se realicen bombeos próximos al pozo u otras actividades que provoquen variaciones en el abatimiento de este.
- Que el agua bombeada no regrese al acuífero.
- Si el acuífero es libre, que el nivel de agua freáticas, sea lo suficientemente profundo como para no tener efectos por evapotranspiración.

2.- Económico:

- Que el pozo sea probado durante el tiempo necesario.
- Que sea fácil y barata la eliminación del agua bombeada, sin crear problemas a terceros.
- Que en caso de pagar indemnizaciones por uso del pozo, las afectaciones a cultivos, instalaciones u otros problemas ocasionados sean menores.
- Que el equipo de bombeo sea óptimo, a fin de evitar repetir la prueba por falta de representatividad de los datos obtenidos, con un equipo de baja potencia.

3.- Operación del equipo:

- Que el pozo haya sido desarrollado correctamente y que se encuentre sin sedimentos en el fondo.
- Que existan facilidades para medir el caudal extraído del pozo.
- Que sea fácil medir el abatimiento del pozo.
- Que sea fácil instalar una tubería de desagüe, para desalojar el agua lo suficientemente lejos, para evitar la recarga (principalmente cuando se trata de acuíferos libres y formaciones arenosas las cuales tienen un alto grado de permeabilidad).

En los aforos se emplean bombas tipo turbina, accionadas por un motor de combustión interna, capaces de variar de revoluciones por minuto, por lo general entre 900 y 2000 revoluciones, la columna debe tener la longitud necesaria para que la bomba no succione aire al abatirse el nivel dinámico, además debe rendir grandes gastos, con el consecuente incremento del 30% al 50% necesario para obtener el caudal crítico, como se mencionó con anterioridad y de esta manera seleccionar el equipo de bombeo para la operación del pozo.

Dentro de la práctica se realizan dos tipos de pruebas de aforo: la prueba de aforo a caudal escalonado discontinuo y la prueba de aforo a caudal escalonado continuo; de acuerdo a las condiciones del pozo se aplica la prueba. Si durante el desarrollo del pozo, se registró que el tiempo de recuperación del nivel estático del agua subterránea es del mismo orden que el tiempo de bombeo, la prueba a aplicar es discontinua; en caso que dicha recuperación sea de un orden mayor, entonces se efectúa una prueba escalonada continua. El tiempo necesario para realizar el aforo depende de la estabilización del acuífero.

Prueba de aforo a caudal escalonado discontinuo. Se realiza mediante el siguiente procedimiento:

1) Con los datos obtenidos durante el desarrollo del pozo (cuando éste se realizó con la misma bomba, con la que se realiza el aforo) se determina el caudal mínimo posible (Q_{min}) y el caudal máximo (Q_{max}), de acuerdo a la capacidad de la bomba; se deben establecer por lo menos 4 caudales de prueba distintos, dentro del rango del Q_{min} – Q_{max} . Conviene que los caudales o escalones no sean muy próximos, ni tampoco muy separados, y que el último escalón se ubique cercano al caudal máximo alcanzado en la etapa de desarrollo.

2) Los caudales, a pesar de ser crecientes de manera escalonada, son constantes en cada intervalo de tiempo. Cuando el gasto y el abatimiento son estables se debe iniciar un nuevo escalón, suspendiendo el bombeo y permitiendo que el nivel estático del agua se recupere por lo menos en un 90 por ciento. En ocasiones no es necesario que la duración de los escalones sea de igual tiempo, debido a que la estabilidad se puede lograr en momentos diferentes para caudales distintos. Este tipo de prueba es larga por las esperas de recuperación.

3) Se tabulan los valores del caudal (Q), abatimiento (S) y caudal específico (Q/S), correspondientes a cada uno de los escalones de prueba, resultados de graficar las lecturas de abatimiento y caudal de extracción. Con los valores representativos de los escalones de prueba, se elaboran las gráficas antes mencionadas Q vs S y Q/S vs S , ambas en campo.

4) Se identifican las posibles anomalías durante la realización de la prueba, de acuerdo al comportamiento de las curvas graficadas, determinando posibles fuentes de error o establecimiento de un desarrollo defectuoso.

5) Se determina el caudal crítico del pozo (Q_c) por inspección de la curva caudal contra abatimiento, conforme se localiza el punto de máxima curvatura de la gráfica.

6) Se ubica el caudal recomendado del pozo (Q_r) entre el 75 y el 80 por ciento del caudal crítico obtenido.

Prueba de aforo a caudal escalonado continuo. Es más rápida en su ejecución, comparada con la anterior, debido a que al transcurrir cada periodo de observación, el bombeo no se suspende en espera de que el nivel estático se recupere, sino que se incrementa el caudal de bombeo al escalón siguiente. Se realiza mediante el siguiente procedimiento:

1) Con los datos obtenidos durante el desarrollo del pozo (cuando éste se realizó con la misma bomba, con la que se realiza el aforo) se determina el caudal mínimo posible (Q_{min}) y el caudal máximo (Q_{max}), de acuerdo a la capacidad de la bomba; se deben establecer por lo menos 4 caudales de prueba distintos, dentro del rango del Q_{min} – Q_{max} . Conviene que los caudales o escalones no sean muy próximos, ni tampoco muy separados, y que el último escalón se ubique cercano al caudal máximo alcanzado en la etapa de desarrollo.

2) Los caudales, a pesar de ser crecientes de manera escalonada, son constantes en cada intervalo de tiempo. Cuando el gasto y el abatimiento son estables se debe iniciar un nuevo escalón, incrementando las revoluciones por minuto al siguiente escalón. En ocasiones no es necesario que la duración de los escalones sea de igual tiempo, debido a que la estabilidad se puede lograr en momentos diferentes para caudales distintos.

3) Se tabulan los valores del caudal (Q), abatimiento (S) y caudal específico (Q/S), correspondientes a cada uno de los escalones de prueba, resultados de graficar las lecturas de abatimiento y caudal de extracción. Con los valores representativos de los escalones de prueba, se elaboran las gráficas antes mencionadas Q vs S y Q/S vs S , ambas se realizan en campo.

4) Se identifican las posibles anomalías durante la realización de la prueba, de acuerdo al comportamiento de las curvas graficadas, determinando posibles fuentes de error o establecimiento de un desarrollo defectuoso.

5) Se determina el caudal crítico del pozo (Q_c) por inspección de la curva caudal contra abatimiento, de acuerdo con la localización del punto de máxima curvatura de la gráfica.

6) Se ubica el caudal recomendado del pozo (Q_r) entre el 75 y el 80 por ciento del caudal crítico obtenido.

La duración de una prueba de aforo esta en relación directa con el tiempo en que se realizan las mediciones de caudal y abatimiento.

Las lecturas simultaneas de caudales y abatimientos, para cada escalón deben efectuarse con la mayor precisión; la exactitud de estas lecturas depende el valor de los resultados obtenidos, con los que se realiza la selección del equipo de explotación.

Las lecturas, principalmente las de abatimiento, se deben realizar de manera continua, al inicio de cada escalón, espaciándose conforme transcurre el tiempo de bombeo. Una propuesta para realizar dichas lecturas en cada escalón, se presenta en la tabla No. 4.2.

Periodicidad de lecturas	Intervalo de tiempo
Cada 15 seg.	0-1 min.
Cada 30 seg.	1-5 min.
Cada 60 seg.	5-10 min.
Cada 5 min.	10-30 min.
Cada 10 min.	30-60 min.
Cada 30 min.	1-6 hr.
Cada 60 min.	6-12 hr.
Tiempos distribuidos de manera logarítmica.	
TABLA No. 4.2 TIEMPOS DE LECTURA PARA PRUEBAS DE AFORO.	

No es necesario que para cada escalón, el tiempo de duración se prolongue hasta las 12 horas, este es variable y se debe suspender o cambiar al próximo, una vez que se ha alcanzado la estabilización del nivel del agua (cuando la lectura muestre una mínima variación).

En acuíferos confinados y especialmente en los semiconfinados, la estabilización se puede conseguir en unas pocas horas; pero en acuíferos libres, esto puede tardar muchas horas e incluso más de un día; en cualquier caso, la estabilización es difícil de lograr y solo queda claro al momento de graficar de forma semilogarítmica los datos obtenidos.

La duración de la prueba depende de las características hidrogeológicas del acuífero, en ocasiones con 12 horas de bombeo es suficiente para establecer la curva característica y lograr los objetivos de la prueba, sin embargo existen casos en los cuales la duración total de la prueba se suele prolongar de manera global desde 24 horas a un máximo de 72 horas.

Cuando durante la prueba, se presente una interrupción de duración importante en cuanto al tiempo de bombeo que se lleva (mayor de 5%), conviene realizar una nueva prueba, reiniciando después de un lapso de tiempo, no menor al que se lleva de prueba y si es posible este lapso debe de ser del doble, en cualquier caso conviene comprobar que se ha recuperado el nivel estático.

En las pruebas de aforo se debe disponer de un sistema que permita medir el caudal y abatimiento, para apreciar sus variaciones; el registro de estas lecturas es parte importante en la realización de las pruebas, así como las observaciones adicionales, en las cuales se deben anotar las incidencias de interés, por ejemplo: cambios de personal, de aparatos de medición, averías, incidentes durante la toma de lecturas, ajustes de caudal, paros, etc.

Es importante que los datos se registren con cuidado y pulcritud, aspecto que en ocasiones es difícil cumplir, cuando existen incomodidades como: inclemencias atmosféricas, muchas horas trabajando; sin embargo, se recomienda tener cuidado para evitar repeticiones costosas, no solo en dinero, sino además en tiempo. Para registrar los datos de caudal y abatimiento se utilizan diferentes equipos.

Entre los métodos y dispositivos hidrométricos de medición utilizados para el caudal, se emplean directos e indirectos; los más comunes son: llenado de un recipiente de volumen conocido, piezómetro con orificio calibrado, el método de escuadra; medidores directos: tipo hélice, turbina y medidores electrónicos.

Llenado de un recipiente de volumen conocido. Este método de medición discontinuo, es el más utilizado por ser práctico. El recipiente se debe llenar en más de 10 segundos a fin de tener precisión en las mediciones. Para caudales de 2 l. p. s. se emplean recipientes de 20 a 30 litros, mientras que para caudales de hasta 10 l. p. s., se emplean recipientes de 200 litros, para caudales mayores se emplean depósitos de mayor capacidad, algunas consideraciones de importancia para obtener resultados confiables son:

- El recipiente debe ser de volumen conocido y encontrarse en buen estado de conservación, el empleo de bidones abollados lleva inherentes errores en el volumen.
- La tubería de conducción del agua debe ser giratoria a fin de ponerla sobre el recipiente y quitarla con rapidez, no se recomienda el uso de mangueras ascendentes, debido a que la variación de elevaciones afecta el caudal de bombeo.
- El recipiente se debe vaciar fácil y rápidamente, sin producir derrames de agua.
- Este sistema de medición, es molesto de operar, sin embargo, con él se alcanzan mediciones con una buena precisión.

Piezómetro con orificio calibrado. Funciona al pasar el agua por un orificio, el cual ejerce un efecto de drenado del agua, provocando una contrapresión, que se manifiesta como una elevación del agua a través de una manguera de 5/16" de diámetro (esta manguera es la que funciona como piezómetro), esta elevación proporciona la lectura del caudal.

Método de la escuadra. Es práctico y rápido, cuando se utiliza un tubo de descarga horizontal y que puede estar trabajando parcial o totalmente lleno.

Medidores directos: son aparatos de traslado, que registran la velocidad del agua, estos se clasifican en dos tipos: hélice y turbina. Estos dispositivos indican directamente la lectura del gasto, por medio de una aguja tipo velocímetro, además que registra el volumen acumulado en metros cúbicos.

Medidor tipo turbina. Este tipo de medidor es recomendable para pozos que extraen agua libre de arena, manejan presiones de trabajo de 7.5 kg/cm² y temperaturas de hasta 65°C; tiene las siguientes características: Funciona con mayor exactitud con el tubo lleno, su tolerancia de error es de $\pm 2\%$, su gasto se mide en m³, las pérdidas de carga son de 0.07 kg/cm², son resistentes a aguas corrosivas. Tiene bridas atornillables para la colocación en la tubería de descarga como se aprecia en la figura 4.2.

Medidor tipo hélice. En el mercado existe una gran variedad de tipos y tamaños, trabajan con presiones de carga de 10.5 kg/cm² y temperaturas de hasta 65°C, son fáciles de instalar; tiene las siguientes características: transmisión magnética, su registro es operado por pulsos magnéticos, presentan salida opcional de pulsos, los baleros que permiten los giros de la hélice son de larga duración, caja sellada, la lectura es en metros cúbicos y su tolerancia de error es de $\pm 2\%$. Tiene bridas atornillables para la colocación en la tubería de descarga como se aprecia en la figura 4.2.

Medidores electrónicos. Normalmente son de tipo hélice, presentan salidas opcionales de impulsos magnéticos generados, que son transmitidos hasta un receptor, que indica digital y gráficamente el gasto instantáneo, como se muestra en la figura.

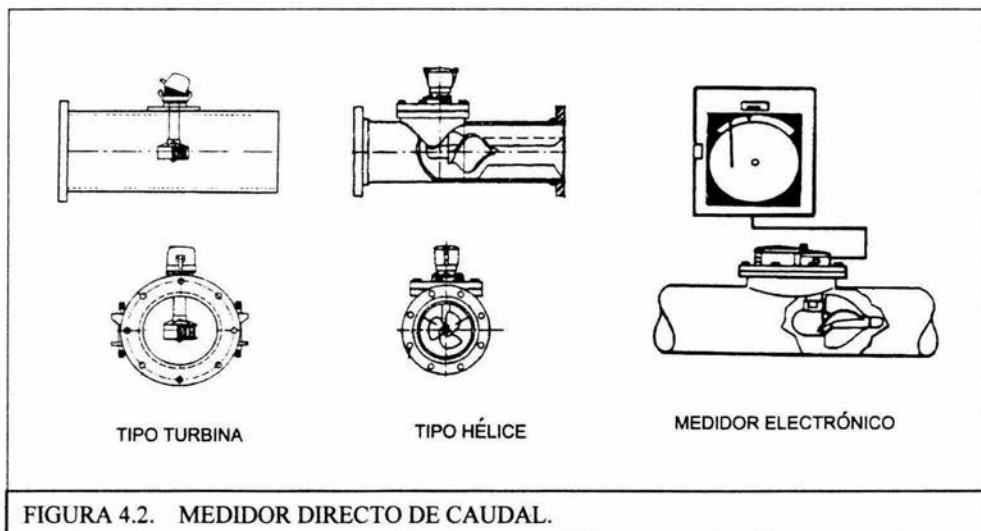


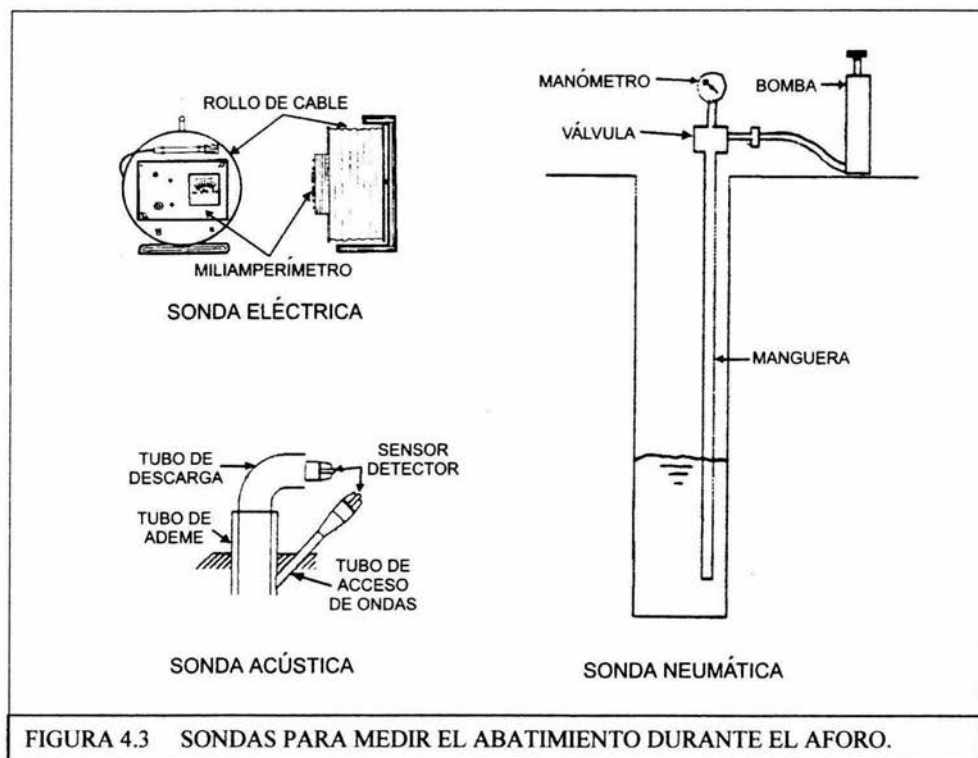
FIGURA 4.2. MEDIDOR DIRECTO DE CAUDAL.

Existen dispositivos para observar el nivel del agua (abatimiento), a estos se les conoce como sondas y de acuerdo a su funcionamiento, se clasifican en eléctricas, neumáticas y ultrasónicas.

Sonda neumática. Es un dispositivo que consta de una manguera de 1/4" de diámetro, la cuál se introduce al interior del pozo a una profundidad mayor que el nivel dinámico del agua, en la parte superior se instala una válvula de aire, un manómetro y una bomba, como se observa en la figura 4.3, posteriormente se inyecta aire a presión hasta que el manómetro se establece, esta lectura se convierte en metros y se calcula la profundidad del nivel del agua.

Sonda eléctrica. Cuenta con un carrete donde se aloja un rollo de cable eléctrico tipo duplex, el cuál se introduce al pozo, al llegar al nivel del agua se cierra el circuito eléctrico, que es detectado por un miliamperímetro instalado en el carrete, como se observa en la figura 4.3. Presenta las siguientes características: no requiere de personal especializado, es un equipo portátil, su mantenimiento es mínimo y el cable de la sonda se encuentra marcado cada 2 metros para facilitar la medición inmediata del nivel del agua.

Sonda acústica. Basa su operación en la reflexión de las ondas sonoras, que son inducidas a través del espacio anular, entre los tubos de succión y de ademe, y que al chocar con el nivel del agua, son reflejadas y detectadas en la superficie, tienen las siguientes características: presentan un límite de operación de 460 metros (1500 pies), tiene una exactitud de 30 cm (1 pie). Es factible para pozos equipados con bombas sumergibles, se emplean en pozos equipados con ademe de acero y PVC, no es factible usarla en pozos equipados con bomba de turbina vertical. En la figura 4.3 se observa su colocación en el brocal del pozo.



Las gráficas gasto-abatimiento (Q vs S) y caudal específico-abatimiento (Q/S vs S), se realizan con los datos obtenidos en el aforo, ya sea el continuo o discontinuo; estas gráficas sirven para determinar, si se trata de: un acuífero a explotar, un acuífero confinado, un acuífero libre o una prueba con datos mal registrados durante el aforo. Las curvas de estos casos se muestran en la figura 4.4.

Curva "A". Es de un acuífero confinado, en la gráfica Q vs S en un inicio muestra un caudal proporcional al abatimiento producido, sin embargo a medida que se obtienen mayores caudales, llega un momento en que el abatimiento producido es mayor con relación al caudal. Es decir al inicio la gráfica muestra una recta, la cual al llegar al caudal crítico se convierte en una parábola. La gráfica Q/S vs S indica que el caudal es constante conforme se incrementa el abatimiento.

Curva "B". Pertenece a un acuífero libre, su comportamiento en la gráfica Q vs S es el de una parábola, en la cual conforme aumenta el caudal constantemente, el abatimiento es cada vez mayor, pero constante; el gasto crítico se presenta cuando la relación deja de ser constante. La gráfica Q/S vs S indica que el gasto va disminuyendo, conforme se incrementa el abatimiento.

Curva "C". Pertenece a un bombeo con datos mal tomados, la gráfica Q vs S es una parábola en la cual a caudales grandes le corresponde abatimientos pequeños, lo cual pertenece a un acuífero irreal. La gráfica Q/S vs S indica que el caudal va en aumento, mientras que el incremento en el abatimiento es mínimo.

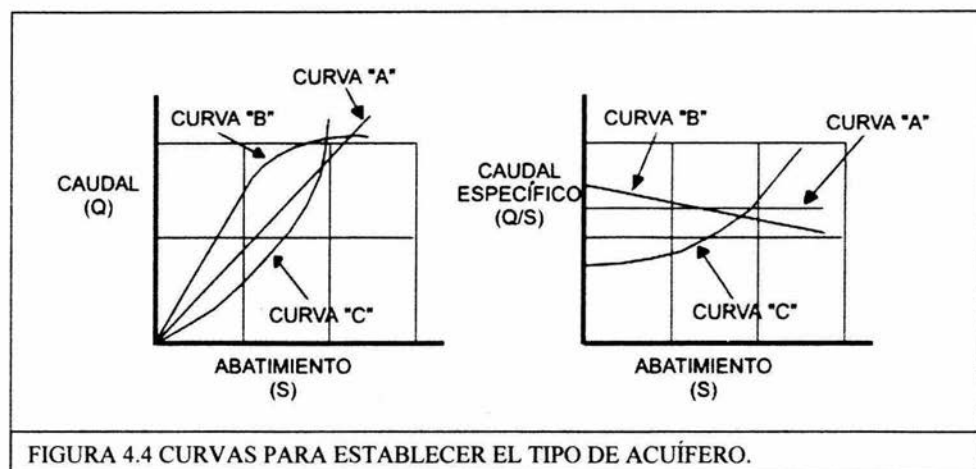


FIGURA 4.4 CURVAS PARA ESTABLECER EL TIPO DE ACUÍFERO.

Las curvas anteriores se realizaron tomando en cuenta que el abatimiento es la diferencia entre el nivel estático y el nivel dinámico de bombeo.

Como en la mayoría de los afloros que se realizan, se encuentran varios acuíferos, o formaciones acuíferas, para conocer el gasto de explotación y el nivel de bombeo dinámico se realiza una gráfica S vs Q con las siguientes características: con los datos de caudal se representan en el eje de las abcisas y los abatimientos en el de las ordenadas, estos últimos se inician con el nivel estático en la parte superior del eje y a partir de este se toman los abatimientos hacia abajo, esto para que cuando se realice la elección del gasto de explotación, se tenga el nivel de bombeo dinámico.

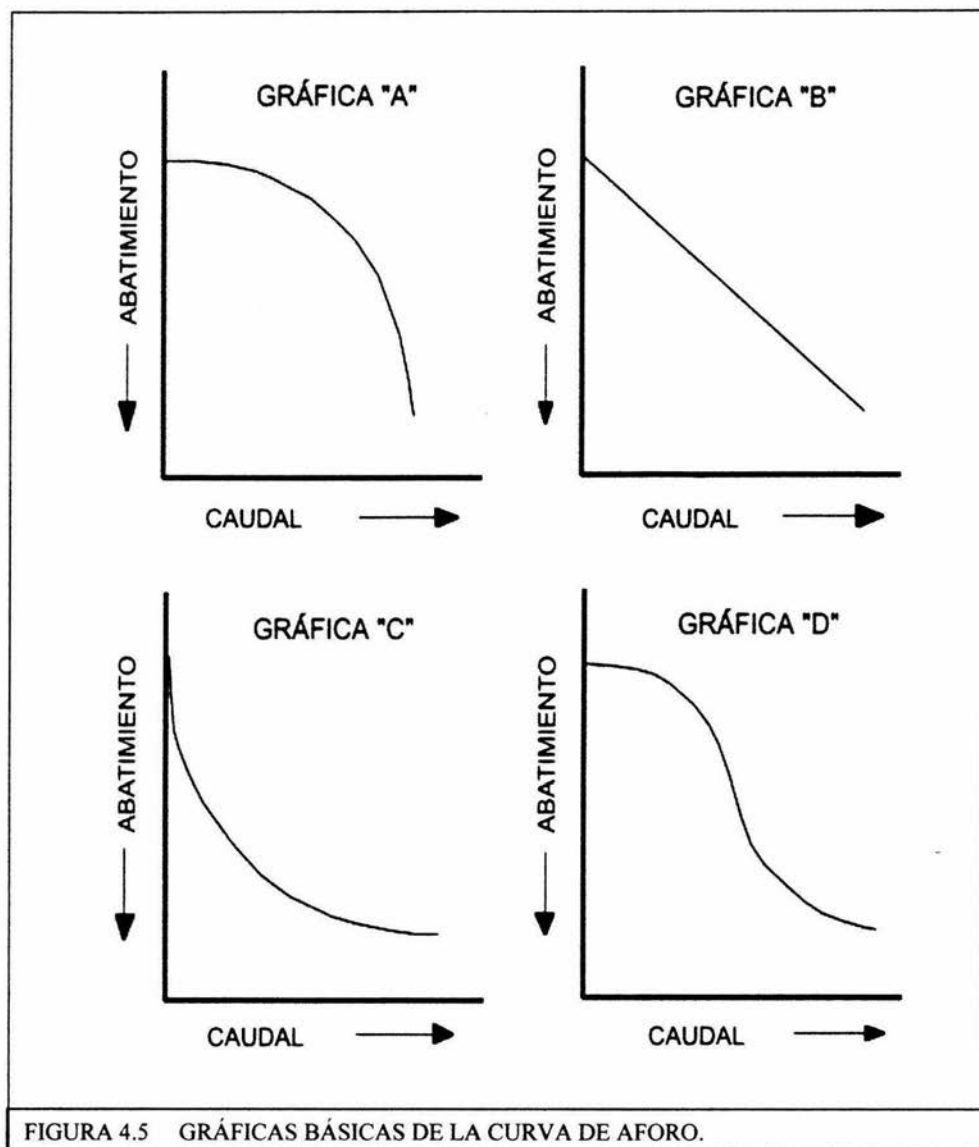
La gráfica de aforo presenta tres formas básicas y una cuarta, la cual se compone de dos de las básicas, como se observa en la figura 4.5.

Gráfica "A". Tiene forma curva con la concavidad hacia abajo. En un principio, la bomba es adecuada a las características del pozo, a reserva de que se haya llegado al caudal óptimo de explotación.

Gráfica "B". Tiene forma recta, en un inicio, la bomba es de poco caudal con respecto a las características del pozo e incapaz de realizar el aforo. El único dato útil que se deduce de la prueba, es que el pozo en cuestión es capaz de proporcionar mayor caudal que el máximo obtenido en el desarrollo.

Gráfica "C". Tiene forma curva con la concavidad hacia arriba, esto indica que durante el aforo, el pozo continúa con el proceso de desarrollo y esta mejorando sus características hidráulicas. Por tanto se debe suspender el aforo y reanudar el proceso de desarrollo; hasta que se tenga la certeza de que esta operación se ha realizado correctamente, se reinicia el aforo.

Gráfica "D". Presenta la concavidad hacia abajo y a partir de cierto momento se invierte hacia arriba. Esto implica que el aforo se había llevado normalmente hasta un instante, en el cual el proceso se torno en desarrollo. Como en el caso anterior se debe suspender la prueba y completar el desarrollo, para posteriormente efectuar el aforo.



El caudal óptimo de explotación depende de circunstancias hidráulicas y económicas: hidráulicamente el caudal debe ser el mayor posible, con un bajo descenso del nivel de bombeo como se observa en la figura 4.6; económicamente el caudal óptimo de explotación involucra: el costo del equipo de bombeo definitivo, su vida útil, la cantidad de energía eléctrica para poner en marcha el equipo, en caso de que no haya energía eléctrica, el costo del motor de combustión y el combustible para ponerlo en marcha; estos datos proporcionan un costo determinado para cada relación de caudal y abatimiento dado, el costo menor será el que se determine para la explotación del pozo.

La siguiente tabla muestra los datos de un aforo, con nivel estático de 75.21 m.

Punto	A	B	C	D	E	F
Caudal	35	40	45	50	55	60
Abatimiento	1.55	2.53	3.65	5.47	15.50	30.30
Nivel dinámico	76.76	77.74	78.86	80.68	90.71	105.51

TABLA No. 4.3 AFORO DEL POZO No. 5, LA MURALLA, GTO.

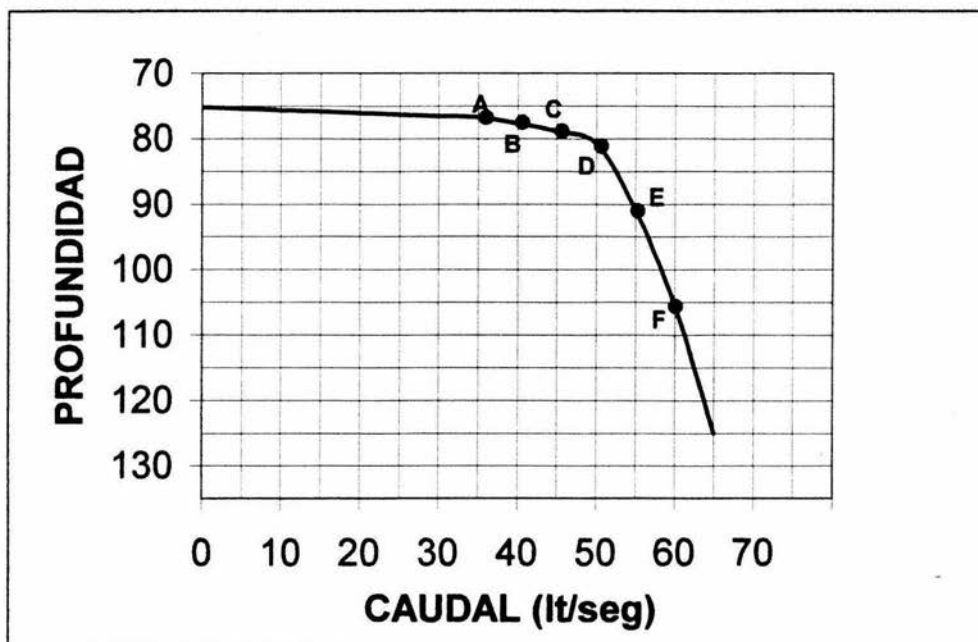


FIGURA 4.6 GRÁFICA DEL AFORO DEL POZO No. 5, LA MURALLA, GTO.

Como se observa, el abatimiento es constante hasta llegar a un gasto de 50 *l. p. s.* a partir de este punto desciende bruscamente, a partir del punto "D" se obtiene el gasto crítico; el gasto de explotación debe ser menor que el crítico, por tanto, debe situarse entre 40 a 45 *l. p. s.*, con un nivel dinámico de 77.74 a 78.86 metros respectivamente.

4.5 SELECCIÓN DEL EQUIPO DE BOMBEO DEFINITIVO.

Con el gasto de explotación y el nivel dinámico de bombeo, obtenidos de la gráfica de aforo se procede a seleccionar el equipo más adecuado. Para esto se recurre al catálogo de bombas tipo turbina para pozo profundo del fabricante, se seleccionan las curvas características de varias bombas, consultando de éstas los siguientes datos: diámetro de la bomba, el cual debe ser mínimo 3" menor que el diámetro de la cámara de bombeo; los caudales en *l. p. s.*, o metros cúbicos por hora; los abatimientos en pies o metros (las unidades de medida están en función de las curvas características que se utilizan para seleccionar el equipo).

El proceso de selección se realiza de dos maneras, de acuerdo con las curvas características.

1.- Cuando las curvas características, son de un solo paso y relacionan el caudal con la carga total. Con la carga total y el gasto máximo se calcula la potencia teórica necesaria del motor de combustión interna para hacer funcionar los impulsores de la bomba, mediante la siguiente expresión:

$$P = \frac{Q H_{TOT}}{76 \eta} \quad (\text{ecuación 4.4})$$

donde:

P = Potencia necesaria, en H. P.

Q = Gasto, en l. p. s.

H_{TOT} = Carga total, en metros de carga.

η = Eficiencia de acuerdo con el gasto (obtenida de curvas características).

76 = Constante para obtener la potencia, en H. P.

La carga total se calcula con la siguiente expresión:

$$H_{TOT} = h_{et} + h_{fs} + h_{fd} + h_{vd} \quad (\text{ecuación 4.5})$$

donde:

h_{et} = Carga estática total (es la suma de la diferencia de los niveles de: el espejo de agua durante el bombeo hasta la bomba y de esta hasta la descarga), en metros de carga.

h_{fs} = Pérdidas por fricción en la succión (es la suma de las pérdidas por fricción en la columna de la bomba y piezas especiales), en metros de carga.

h_{fd} = Pérdidas por fricción en la descarga (es la suma de las pérdidas por fricción en la tubería de la descarga y piezas especiales), en metros de carga.

h_{vd} = Carga de velocidad en la descarga, en metros de carga.

La carga estática también se puede definir como la suma del nivel dinámico de bombeo más la diferencia entre el nivel del brocal y el nivel de descarga.

Cuando se tengan las facilidades de utilizar la corriente eléctrica, se utiliza ésta en vez del motor de combustión interna, siempre y cuando se cumpla con la potencia necesaria en Kw, considerando que 1.0 H. P. = 745 Watts.

La potencia teórica se tiene que afectar por un factor de eficiencia en campo el cual esta constituido por:

· Pérdidas de eficiencia del equipo al operar a una altitud determinada. Las pérdidas de eficiencia por altitud, se obtendrán de una gráfica proporcionada por la casa fabricante del equipo de bombeo.

· Pérdidas en transmisiones y trabajo continuo del motor, en caso de que no exista energía eléctrica.

2.- Cuando las curvas características disponibles, relacionan el gasto con la carga total en pies por paso, de esta se define el número de pasos y carga efectiva; la cual toma en cuenta, si la descarga se realiza en un depósito cercano o en una línea de conducción, la cual lo llevara a un depósito alejado, el nivel del almacenamiento con respecto al nivel del brocal del pozo; de acuerdo a las necesidades, mediante las siguientes expresiones:

$$N = \frac{H_{TOT}}{H_p} \quad (\text{ecuación 4.6});$$

$$H_E = N \cdot H_p \quad (\text{ecuación 4.7})$$

donde:

N = Número de pasos.

H_{TOT} = Carga total, en *metros de carga*.

H_p = Carga por paso, en *metros de carga*.

H_E = Carga efectiva, en *metros de carga*.

La carga total se calcula con la ecuación 4.5, como el número de pasos, muy pocas veces será exacto, se redondea al próximo entero superior, con este dato se obtiene la carga efectiva, la cual debe ser lo más cercana a la carga total.

Con los valores del gasto y de la carga efectiva se calcula la potencia teórica necesaria del motor de combustión interna para hacer funcionar los impulsores de la bomba, aplicando la ecuación 4.4, intercambiando la carga total por la efectiva como se muestra a continuación:

$$P = \frac{Q H_E}{76 \eta}$$

La diferencia entre ambos procesos de selección, únicamente se presenta en que la potencia del motor de combustión tiene que ser ligeramente mayor en este caso, y por lo tanto repercute en el costo del equipo.

Para hacer la selección óptima del equipo, se realiza una búsqueda en las curvas características, con el fin de escoger la que tenga el aprovechamiento más cercano a las condiciones del pozo y el menor costo.

V. CALIDAD DEL AGUA.

El agua subterránea que se localiza durante los trabajos de perforación, procede generalmente de infiltraciones, las formaciones permeables a través de las cuales fluye esta en el subsuelo, son espacios muy pequeños, lo que restringe considerablemente su velocidad y al mismo tiempo proporciona una acción filtrante de las partículas que se encuentran en suspensión en el agua, esto afecta de manera considerable las características físicas, químicas y microbiológicas del agua.

Los muestreos de agua se realizan de diferente manera, de acuerdo al tipo de análisis que se practique: físico, químico, bacteriológico y radiactivo.

5.1 LA CALIDAD FÍSICA.

La calidad física del agua se determina "in situ", la toma de muestras se realiza cuando el pozo se pone en marcha, las muestras se colocan en frascos.

Los parámetros básicos de análisis son: color, turbiedad, olor y sabor. En tabla No. 5.1, se indican los límites máximos permisibles de estos parámetros, de acuerdo a la "modificación a la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental, agua para uso y consumo humano", publicada en noviembre de 2000.

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas o su equivalente en otro método.
Olor y sabor	Agradable (se aceptaran aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico.
TABLA No. 5.1 LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE PARÁMETROS FÍSICOS.	

La afectación de las características físicas del agua indican que contienen elementos: vegetales, químicos o bacteriológicos.

5.2 LA CALIDAD QUÍMICA.

El agua químicamente pura no existe en la naturaleza, su carácter disolvente la capacita para actuar sobre gases, sólidos y líquidos; por lo que toda el agua, no importa su estado ni la fuente de la cual proceda, se encuentra cargada en mayor o menor grado de sustancias en soluciones, generalmente gases y sales. Los constituyentes químicos son continuamente modificados en cualquier área de la corteza terrestre. El comportamiento químico del agua depende de la composición de las rocas por las que circula y los factores que afectan la solubilidad, tales como: la previa composición química del agua, la temperatura del agua, la longitud de recorrido, la velocidad de circulación a

través de las distintas formaciones, el tiempo y área de contacto del agua con las formaciones.

Es necesario que cada muestra obtenida, se recolecte en un frasco de vidrio o polietileno con un volumen de entre uno y dos litros, dicho frasco se debe enjuagar con agua de la fuente a muestrear, dos o tres veces antes de proceder al muestreo, también se deberá llenar completamente para evitar la gasificación, ya que esto altera la composición química de las muestras; es necesario que para tomar la muestra transcurran por lo menos dos horas entre la toma y el inicio de bombeo. Cuando el pozo carece de equipo de bombeo, es necesario utilizar aparatos para la toma de muestras, los cuales una vez colocados en la profundidad deseada son abiertos dejando que el agua penetre en el envase, una vez lleno, el dispositivo es obturado e izado a la superficie.

En la tabla No. 5.2, se indican los límites permisibles de los parámetros que se analizan químicamente, de acuerdo a la "modificación a la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental, agua para uso y consumo humano", publicada en noviembre de 2000.

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Aluminio	0.200
Arsénico se ajustará anualmente:	
2000	0.050
2001	0.045
2002	0.040
2003	0.035
2004	0.030
2005 en adelante	0.025
Bario	0.700
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN)	0.070
Cloro residual libre	0.2000-1.500
Cloruros (como Cl)	250.000
Cobre	2.000
Cromo total	0.050
Dureza total (como CaCO ₃)	500.000
Fenoles o compuestos fenólicos	0.300
Fierro	0.300
Fluoruros (como F)	1.500
Hidratos aromáticos en microgramos / litro:	
Benceno	10.000
Etilbenceno	300.000
Tolueno	700.000
Xileno (tres isómeros)	500.000
Manganeso	0.150

TABLA No. 5.2 LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE PARÁMETROS QUÍMICOS.

Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10.000
Nitritos (como N)	1.000
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.500
Potencial de hidrógeno (pH) en unidades de pH	6.5-8.5
Plaguicidas en microgramos / litro:	
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.030
Clordano (total de isómeros)	0.200
DDT (total de isómeros)	1.000
Gamma-HCH (lindano)	2.000
Hexaclorobenceno	1.000
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.030
Metoxicloro	20.000
2.4-D	30.000
Plomo	0.010
Sodio	200.000
Sólidos disueltos totales	1000.000
Sulfatos (como SO ₄)	400.000
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.500
Trihalometanos totales	0.200
Yodo residual libre	0.200-0.500
Zinc	5.000
Los límites se expresan en mg / litro, excepto cuando se indique otra unidad.	
CONTINUACIÓN DE LA TABLA No. 5.2	

Cuando estos límites son excedidos, provocan daños a la salud, a continuación se presenta la existencia de algunos compuestos y la relación que tienen con dichos daños, por ejemplo:

Cloro. Se encuentra presente en todas las aguas naturales en las cuales es muy estable en disolución, no se oxida ni se reduce, difícilmente el agua llega a saturarse de este elemento, ya que casi nunca precipita. Las fuentes principales de cloruros son el agua de mar, las rocas sedimentarias, los desechos urbanos e industriales y el lavado de terrenos de origen marino. El conocimiento de este parámetro nos ayudan a conocer las aguas denominadas salmueras, ya que llegan a contener hasta 220000 mg/litro, mientras que el agua de lluvia contiene 3 mg/litro.

Calcio y magnesio. Forman parte del grupo de los metales alcalinotérreos, ambos se encuentran distribuidos tanto en rocas ígneas, como en sedimentarias, así como en solución. El calcio es muy soluble, y junto con el magnesio contribuyen a la dureza del agua. La dureza producida por el bicarbonato de calcio y magnesio, se puede eliminar casi por completo hirviendo el agua; mientras que los sulfatos y cloruros de calcio y magnesio no se puede eliminar por ebullición, cuando el calcio forma un carbonato, hace variar el pH o la presión parcial del dióxido de carbono. En el agua de lluvia la concentración es menor de 1 mg/litro, en agua dulce alcanza valores de 250 mg/litro, entre las salmueras puede alcanzar hasta 50,000 mg/litro.

Fluoruro. Su concentración es generalmente pequeña y proviene principalmente del deslave de las rocas ígneas. Cuando se encuentra en concentraciones menores de 1.00 mg/litro, generalmente se disminuye la incidencia de caries dental en los niños y es conveniente su presencia, sin embargo, aguas con más de 4 mg/litro pueden afectar la estructura ósea.

Nitrato. El contenido de éste en las aguas del subsuelo varía considerablemente, a menudo no está relacionado con las formaciones geológicas de la zona. Las concentraciones elevadas de nitrato se deben muy frecuentemente a la percolación de las aguas superficiales que contienen desperdicios humanos y/o animales y otros productos de desecho agrícola en las capas acuífero o al flujo directo de corriente superficiales contaminadas hacia los pozos. Por lo tanto se deben tomar precauciones en la localización y construcción de pozos que aprovechen aguas del nivel freático, en áreas donde se encuentran retretes resumideros y corrales. Las concentraciones elevadas de nitrato producen un efecto conocido como cianosis en los niños, esta afección se caracteriza por una coloración azulosa en la piel indiferencia y aletargamiento, puede ser mortal, por esta razón el agua que contiene nitrato en exceso de 450 mg/litro no debe usarse en la preparación de alimentos. Se debe hacer notar que al hervir este tipo de agua solamente se consigue aumentar la concentración de nitrato.

Potencial de hidrógeno (ph). Es una medida de la concentración de hidrógeno en el agua que indica si esta es ácida o alcalina. Sus valores varían entre 0 y 14, siendo el valor 7 el que indica el agua neutra, los valores entre 7 y 0 la acidez creciente y entre 7 y 14 el aumento de alcalinidad en las aguas. La mayoría de las aguas del subsuelo tienen valores de ph que varían aproximadamente, de 5.5 a 8. La terminación del valor de ph es importante en el control de la corrosión y muchos procesos en el tratamiento del agua.

Azufre. Se encuentra en el agua ampliamente en forma de sulfatos, la mayoría de estos compuestos metálicos son fácilmente solubles en agua, las principales fuentes de sulfato son: las rocas sedimentarias, los terrenos formados en ambientes áridos y marinos; las actividades industriales, urbanas y agrícolas. El contenido de sulfatos en el agua de lluvia es menor de 1 mg/litro, en las aguas naturales el rango es muy amplio (2 a 5000 mg/litro), el agua de mar tiene un promedio de 3000 mg/litro y las salmueras llegan a tener hasta 200000 mg/litro. El sulfato de sodio en cantidades suficientes, puede producir efectos lactantes.

5.3 LA CALIDAD MICROBIOLÓGICA.

Las aguas del subsuelo están exentas de organismos muy pequeños (microbios), que causan enfermedades y están presentes en las aguas superficiales. Este es uno de los beneficios que resulta de la acción de la filtración lenta al circular el agua través del subsuelo. Además de que también al faltar oxígeno y nutrientes en el agua del subsuelo, esto la vuelve un medio inapropiado para los organismos patógenos.

Las muestras deben ser tomadas, mediante muestreadores de aguas profundas, en intervalos no mayores de 10 metros, éstas se vacían en frascos esterilizados, con capacidad mínima de un litro. El envío al laboratorio se efectúa inmediatamente, los parámetros a analizar son coliformes: totales y fecales, en la tabla No. 5.3, se indican los límites permisibles de estos parámetros, de acuerdo a la "modificación a la norma oficial

mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental, agua para uso y consumo humano", publicada en noviembre de 2000.

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Organismos coliformes totales.	Ausencia o no detectables.
E. coli o coliformes fecales u organismos termotolerantes.	Ausencia o no detectables.
TABLA No. 5.3 LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS.	

De acuerdo con la tabla anterior el agua solamente se dividen en potable y no potable.

5.4 LA CALIDAD RADIACTIVA.

Las formaciones del subsuelo presentan diminutas porciones de materiales radiactivos, el agua al estar dentro de dichas formaciones la adquiere en pequeñas cantidades.

En la tabla No. 5.4. se presentan lo limites permisibles radiactivos de acuerdo a la "modificación a la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental, agua para uso y consumo humano", publicada en noviembre de 2000.

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE Bq/l (Becquerel por litro)
Radiactividad alfa global.	0.56
Radiactividad beta global.	1.85
TABLA No. 5.4 LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE PARÁMETROS RADIACTIVOS.	

VI. DISEÑO DEL POZO UBICADO EN DURAZNO NO. 2, DEL MUNICIPIO DE JEREZ, ZACATECAS.

Se da inicio con el sondeo geoelectrico y su interpretacion, del cual se obtiene la profundidad de la perforacion; durante esta, se efectua una toma de muestras, para realizar el corte geologico y la granulometria de las formaciones perforadas; al termino o durante la perforacion se realiza la corrida del registro electrico para confirmar los espesores de las formaciones perforadas; con estos datos se efectua una correlacion de estudios, con la cual se realiza el diseno y la ubicacion de la tuberia productora y de la eleccion del filtro artificial.

El sondeo geoelectrico, se corrio hasta una profundidad de 220 metros, se observa en la figura 6.1.

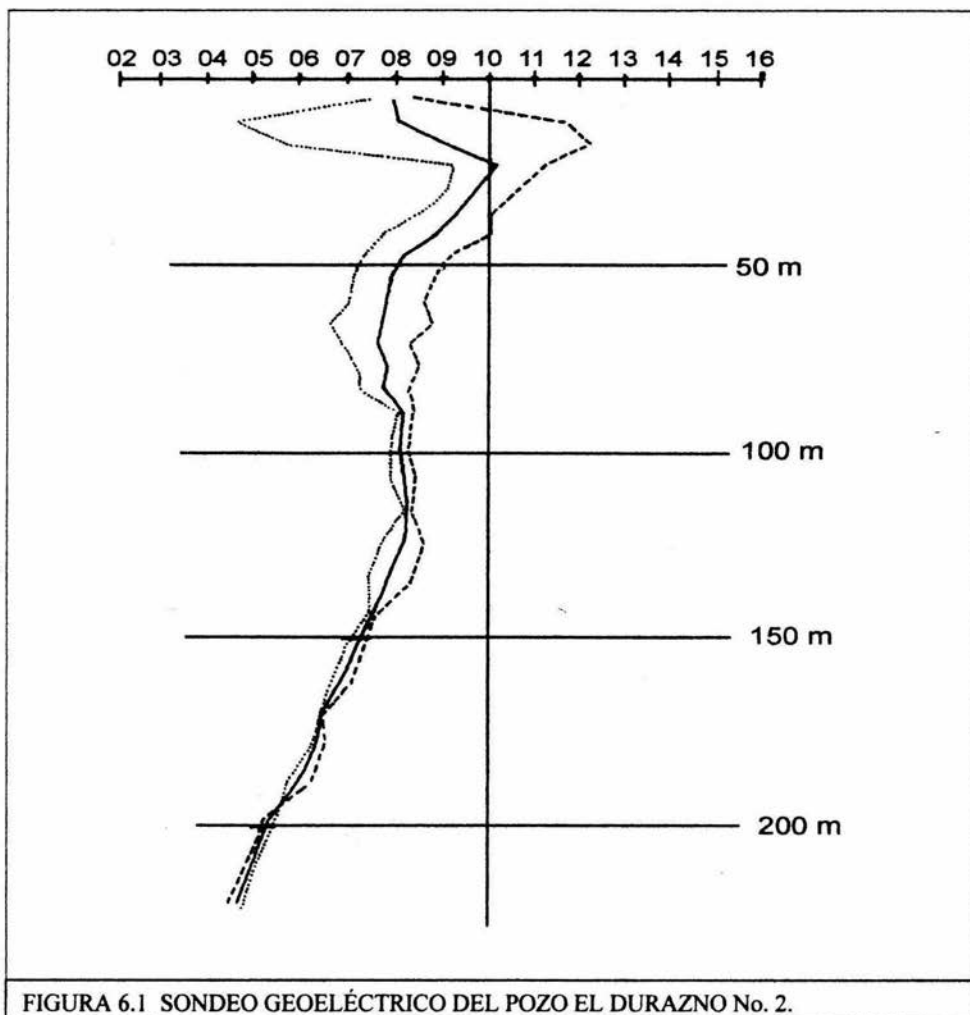


FIGURA 6.1 SONDEO GEOELÉCTRICO DEL POZO EL DURAZNO No. 2.

La gráfica muestra que hasta una profundidad de 25 metros existe un comportamiento anisotrópico de las curvas, lo que indica una diferencia en las características geoelectricas del terreno (saturación, granulometría, compacidad, composición mineralógica, etc.), de los 25 a los 80 metros aproximadamente la anisotropía de las curvas tiende a disminuir y de los 80 metros a la profundidad total se presenta una isotropía más definida, lo cuál indica formaciones con características físicas similares. De los 40 metros a la profundidad total se presentan condiciones de saturación, siendo menores de los 160 a los 220 metros.

Con los resultados anteriores (entregados por la empresa que realiza el sondeo), se procede a elaborar el programa de perforación, el cual consiste en efectuar una perforación con carácter exploratorio, hasta la profundidad de 160 metros, en un diámetro de 12 1/4". El reconocimiento geohidrológico, indica que la zona se encuentra localizada dentro de un valle en el que predominan las riolitas, este se encuentra formado por materiales detríticos, tales como arenas, gravas, boleos, etc. tomando en consideración que los materiales por perforar son de acarreo, se opta por emplear un equipo de perforación tipo rotatorio.

De acuerdo a los pozos existentes en la zona, el gasto (Q) que se pretende obtener es de 80 lt/seg, por lo que el diámetro de los tazones y del ademe; se calculan aplicando las siguientes expresiones 3.1 y 3.2:

FÓRMULAS	DATOS	SUSTITUCIÓN	RESULTADOS
$D_t = \sqrt{Q} + 1$	$Q = 80 \text{ lt/seg}$	$D_t = \sqrt{80} + 1$	$D_t = 9.94''$
$D_A = D_t + 3$	$D_t = ?$	$D_A = 9.94 + 3$	$D_A = 12.94''$
	$D_A = ?$		

donde:

D_t = Diámetro de los tazones, en *pulgadas*.

D_A = Diámetro de ademe, en *pulgadas*, diámetro comercial 14" (356 mm).

Para obtener el diámetro de la perforación, se considera un filtro de grava de 3" de espesor, por lo que la perforación se realiza de 20" de diámetro.

Con las muestras de los recortes, obtenidos durante la perforación; se forma el corte geológico, el cuál tiene la siguiente distribución:

0	-	2 m	Tierra vegetal.
2	-	22 m	Arenas gruesas, gravas y boleos.
22	-	25 m	Arenas gruesas.
25	-	65 m	Arcillas con intercalaciones de arena fina.
65	-	73 m	Arcilla.
73	-	120 m	Arenas de grano medio con poca arcilla.
120	-	158 m	Arenas de grano fino a medio.
158	-	160 m	Arenas gruesas y gravas.

La corrida del registro eléctrico se realizó con aparato de un electrodo, hasta una profundidad de 160 metros, tomando una curva de potencia natural y otra de resistividad, como se muestra en la figura 6.2.

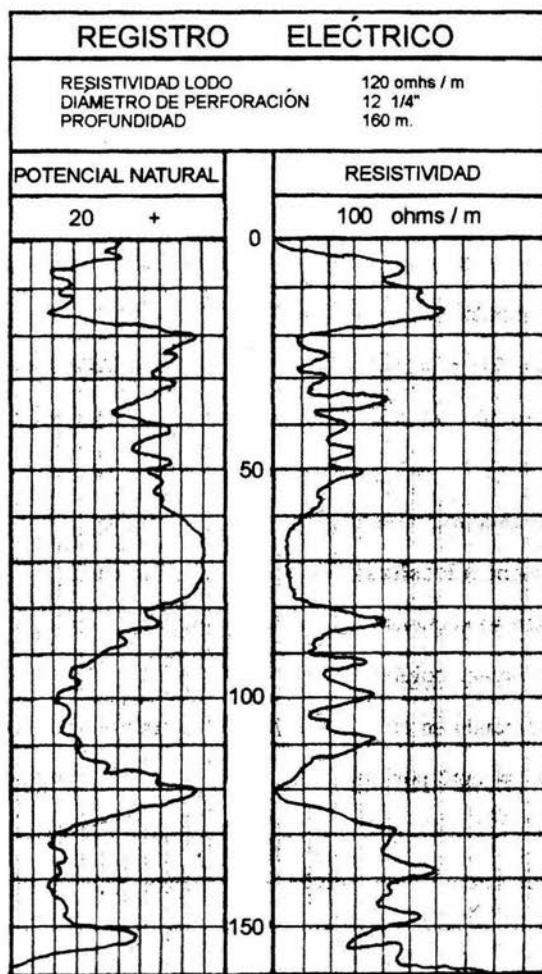


FIGURA 6.2 REGISTRO ELÉCTRICO DEL POZO DURAZNO No. 2.

De donde se obtienen los siguientes resultados:

- 0 a 25 m En este tramo las curvas de potencial natural y resistividad indican una formación permeable, constituida por gravas y boleos.
- 25 a 65 m Formación constituida por arenas de grano medio a fino.
- 65 a 73 m Formación poco permeable, constituida de material arcilloso.
- 73 a 120 m Las curvas de potencia natural y resistividad, indican la presencia de un cuerpo poroso y permeable, constituido por arenas de grano medio a grueso con intercalaciones de gravas de poco espesor.

120 a 160 m Formación constituida por intercalaciones de arenas gruesas y gravas. En el tramo comprendido de 155 a 160 metros se aprecia un incremento de la porosidad y la permeabilidad, al tenerse un cuerpo formado por gravas; se considera conveniente profundizar el pozo, perforando la zona de gravas, hasta el cambio de formación.

De las muestras obtenidos durante la perforación, por el método de cuarteo se analizaron cinco muestras, seleccionadas por la correlación del corte geológico y el registro eléctrico, obteniendo los siguientes resultados:

<u>CURVA 1 TRAMO 0 - 25</u>			
No. Malla	Peso retenido (grs)	% Retenido parcial	% Acumulado
6	217.30	21.73	21.73
10	214.60	21.46	43.19
20	202.70	20.27	63.46
40	72.40	7.24	70.70
60	39.40	3.94	74.64
100	24.40	2.44	77.08
Charola	<u>229.20</u>	<u>22.92</u>	100.00
Sumas	1000.00	100.00	

Peso con el que se efectuó la prueba 1000 grs.

<u>CURVA 2 TRAMO 25 - 65</u>			
No. Malla	Peso retenido (grs)	% Retenido parcial	% Acumulado
6	149.70	14.97	14.91
10	120.10	12.01	26.98
20	180.90	18.09	45.07
40	100.00	10.00	55.07
60	68.10	6.81	61.88
100	36.10	3.61	65.49
Charola	<u>345.10</u>	<u>34.51</u>	100.00
Sumas	1000.00	100.00	

Peso con el que se efectuó la prueba 1000 grs.

<u>CURVA 3 TRAMO 65 - 73</u>			
No. Malla	Peso retenido (grs)	% Retenido parcial	% Acumulado
6	10.00	1.00	1.00
10	70.00	7.00	8.00
20	106.00	10.60	18.60
40	129.00	12.90	31.50
60	148.00	14.80	46.30
100	206.00	20.60	66.90
Charola	<u>331.00</u>	<u>33.10</u>	100.00
Sumas	1000.00	100.00	

Peso con el que se efectuó la prueba 1000 grs.

CURVA 4 TRAMO 73 - 120

No. Malla	Peso retenido (grs)	% Retenido parcial	% Acumulado
6	61.50	6.15	6.15
10	109.00	10.90	17.05
20	229.40	22.94	39.99
40	207.90	20.79	60.78
60	119.30	11.93	72.71
100	47.10	4.71	77.42
Charola	225.80	22.58	100.00
Sumas	1000.00	100.00	

Peso con el que se efectuó la prueba 1000 grs.

CURVA 5 TRAMO 120 - 161

No. Malla	Peso retenido (grs)	% Retenido parcial	% Acumulado
6	26.80	2.68	2.68
10	90.70	9.70	11.75
20	243.90	24.39	36.14
40	205.60	20.56	56.70
60	120.10	12.01	68.71
100	47.20	4.72	73.43
Charola	265.70	26.57	100.00
Sumas	1000.00	100.00	

Peso con el que se efectuó la prueba 1000 grs.

Con los datos anteriores se realiza la gráfica de granulometría, figura 6.3.

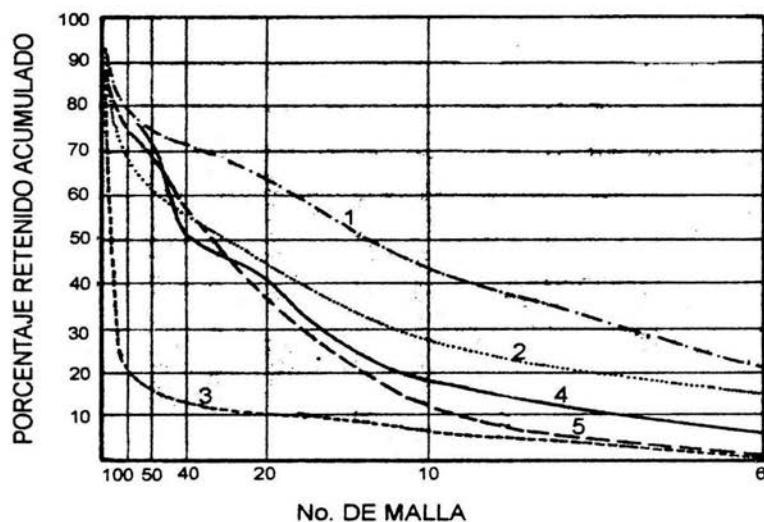
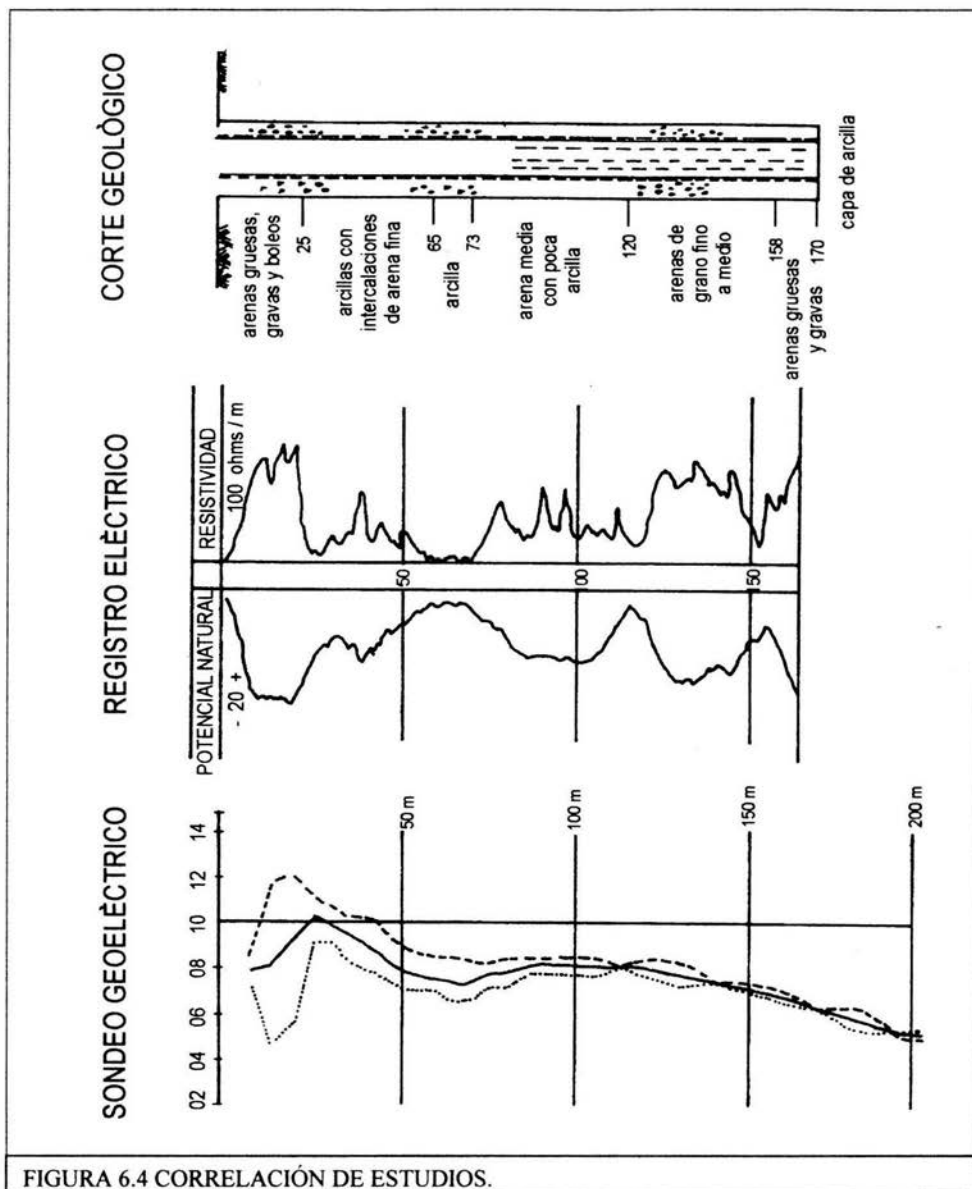


FIGURA 6.3 CURVAS GRANULOMÉTRICAS DEL POZO EL DURAZNO No. 2.

Al comparar las curvas de esta gráfica con las curvas de la figura 3.13, se observa una similitud de las muestras 1, 2, 4 y 5 con la curva Clase "D" y la muestra 3 con la curva Clase "B", esta información nos sirve para la elección del filtro.

Para establecer el tamaño de las partículas del filtro, se realizó la correlación de estudios para ubicar la tubería productora. Para correlacionar y comparar los estudios del sondeo geoelectrico, registro eléctrico y corte geológico. Se elaboró la figura 6.4.



De la figura anterior se obtiene:

- 0 a 25 m En el sondeo geoelectrico se presenta un comportamiento anisotropico de las curvas, producido por una diferencia de las características geoelectricas, originadas de acuerdo al registro eléctrico y el corte geológico; de una formación no homogénea compuesta de gravas, arenas, boleas, etc.
- 25 a 73 m En el sondeo geoelectrico se observa que la anisotropía general tiende a desaparecer. La curva del registro eléctrico y el corte geológico, indican una formación que tiende a ser homogénea. El tramo de arcilla comprendido de los 65 a los 73 metros por su poco espesor no se encuentra definido en la curva del sondeo, pero en el registro eléctrico y el corte geológico, se aprecia bien.
- 73 a 125 m El sondeo indica un cuerpo homogéneo que se confirma por el registro eléctrico y el corte geológico; de arenas de grano fino a medio, que integran una formación uniforme.
- 125 a 160 m El registro eléctrico y el corte geológico indican una formación de arenas medias a gruesas con pequeñas intercalaciones de arena fina y arcilla. Hacia el fondo, por su mayor permeabilidad es probablemente el acuífero de mayor productividad, por la presencia de material granular grueso, al confirmar este material el análisis granulométrico de la última formación analizada, se continuó la perforación hasta 170 metros, profundidad en la que se detectó una capa arcillosa.

Tomando en consideración que el reconocimiento geohidrológico de la zona, indica un nivel estático del orden de 30 metros y nivel de bombeo de 63 metros aproximadamente, al correlacionar los estudios, se recomienda colocar tubería ciega hasta después de la formación arcillosa, esta zona se encuentra hasta los 73 metros, para evitar la infiltración de arcilla al interior del pozo, se profundiza la tubería 4 metros, por tanto la tubería productora se inicia a partir de los 77 metros.

La longitud de la tubería productora (al atravesar formaciones de arenas finas, arenas medias, arenas gruesas, intercalaciones de arcillas y gravas) es recomendable que ocupe el 100 % de la longitud restante del pozo, es decir de 77 hasta 170 metros.

Con la longitud de tubería productora de 93 metros, el gasto de 80 lts/seg y una velocidad máxima de infiltración de 3 cm/seg; se obtiene el área de infiltración total y por tramo de tubería, aplicando las expresiones 3.5 y 3.6:

FÓRMULAS	DATOS	SUSTITUCIÓN	RESULTADOS
$A_T = \frac{Q}{V}$	$Q = 80000 \text{ cm}^3 / \text{seg}$ $V = 3 \text{ cm/seg}$	$A_T = \frac{80000 \text{ cm}^3 / \text{seg}}{3 \text{ cm / seg}}$	$A_T = 26666 \text{ cm}^2$
$A_{TT} = \frac{A_T}{L_{TP}} (L_{TT})$	$L_{TP} = 93 \text{ m}$ $L_{TT} = 6.10 \text{ m}$ $A_T = ?$ $A_{TT} = ?$	$A_{TT} = \frac{26666 \text{ cm}^2}{93 \text{ m}} (6.10 \text{ m})$	$A_{TT} = 1749 \text{ cm}^2 / \text{tramo}$

donde:

A_T = Área total de infiltración, en cm^2 .

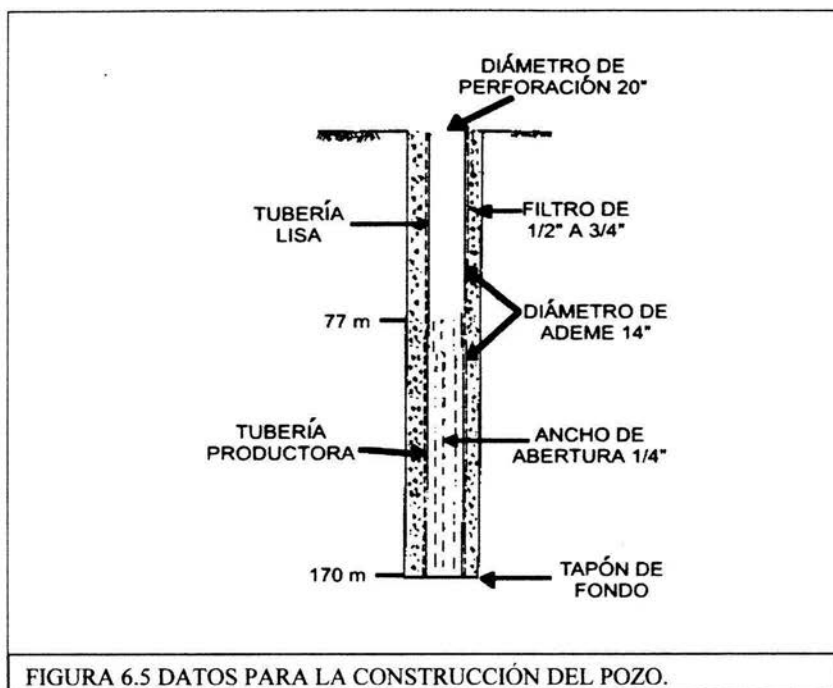
A_{TT} = Área de infiltración por tramo, $cm^2 / tramo$.

L_{TT} = Longitud de tramo de tubería comercial, es de 6.10 m.

Cada tramo de tubería productora, debe tener la porción ranurada en una longitud de 5.60 metros, ya que sus extremos deben ser lisos de 0.25 metros.

Debido a que las formaciones presentan partículas de diferentes tamaños se hace necesaria la utilización de un filtro artificial, de las cinco curvas granulométricas la tercera formación (de 65 a 73 metros) corresponde a la capa de arcilla. Para determinar el filtro de grava adecuado se selecciona de las formaciones productoras la que presenta el material más fino, siendo esta la que pertenece a la muestra dos. Observando la curva Clase "D" se tiene una muestra constituida por arena y grava fina, para la cual se requiere un filtro de grava de 12.7 mm (1/2") a 19.05 mm (3/4") y una abertura de ranura de 6.3 mm (1/4"), estos datos los obtenemos de la curva Clase "D".

Con los datos obtenidos, se dibuja la distribución de la tubería de ademe y filtro, así como los datos necesarios para la construcción del pozo.



Para evitar que la formación arcillosa que se localiza en el fondo, desplace finos al interior del pozo durante el bombeo, se requiere la construcción del tapón de fondo, el cual se realiza de lechada por si en un futuro se desea profundizar el pozo. La longitud del tapón deberá ser mínima de 1 metro.

CONCLUSIONES.

La construcción de pozos profundos para la explotación de agua subterránea, adquiere cada vez mayor importancia, debido al crecimiento de los centros poblacionales y a la necesidad de cumplir con el abastecimiento de agua potable, así como a la contaminación de los cuerpos de agua superficial. Resulta cada vez más costoso conducir el agua de los cuerpos superficiales, hasta las grandes ciudades, haciéndose necesaria la explotación de los mantos acuíferos en la zona de abastecimiento, esta explotación resulta más económica que las grandes líneas de conducción.

En cuanto al aprovechamiento de estos acuíferos, se debe cuidar que el volumen máximo de extracción sea igual o menor al volumen de recarga. La sobreexplotación de los mantos acuíferos, hace descender el nivel freático de la zona donde se encuentra el pozo, provocando hundimientos y daños a las construcciones en la superficie.

En los pozos cercanos al mar se debe cuidar la sobreexplotación, ya que con esta se realiza una infiltración de agua salada hacia el interior del pozo, provocando con esto daños a la tubería por la salinidad y el cambio de agua potable por agua salobre.

Debido a que el abastecimiento de agua potable, resulta costoso y cada vez es más difícil encontrar fuentes para dicho suministro, se deben realizar campañas para concientizar a la población acerca del cuidado, uso y consumo del agua; tanto por las autoridades, que realizan la construcción, operación y mantenimiento de las obras de conducción y distribución; como para la ciudadanía. Por ejemplo en la ciudad de México según estadísticas se pierde cerca del 40% del agua en las tuberías de distribución, debido a fugas, esto se puede evitar si la población reporta cualquier indicio de fuga y las autoridades competentes verifican oportunamente estos reportes.

El uso inadecuado del agua, ocasionará que las generaciones futuras dispongan de una menor cantidad del vital líquido, con el cual no podrán satisfacer sus necesidades básicas, debido a esto la importancia del cuidado del agua potable en la actualidad.

BIBLIOGRAFÍA.

Benítez Alberto, "Captación de aguas subterráneas", Madrid, España, 1972, Editorial Dossat.

Castany G., "Prospección y explotación de las aguas subterráneas", Barcelona, España, 1975, Ediciones Omega.

Castany G., "Tratado práctico de las aguas subterráneas", Barcelona, España, 1971, Ediciones Omega.

C. N. A. "Rehabilitación de pozos, libro III – 2.1", marzo de 1994. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento, Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial, Gerencia de normas técnicas.

C. N. A. "Perforación de pozos, libro V – 3.3.1", julio de 1994. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento, Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial, Gerencia de normas técnicas.

Fair Gordon Maskew y Geyer John Charles, "Ingeniería sanitaria y de aguas residuales", México, D. F., 1990, Editorial Limusa.

Francini Joseph y Linsley Ray, "Ingeniería de los recursos hidráulicos", México, D. F., abril de 1988, Compañía Editorial Continental.

Gibson Ulric y Singer Rexford, "Manual de los pozos pequeños", México, D. F., mayo de 1989, Editorial Limusa.

López Alegría Pedro, "Abastecimiento de agua potable, disposición y eliminación de excretas", México, D. F., 1994, I. P. N.

Pürschel Wolfgang, "La captación y el almacenamiento del agua potable", tomo 5 del tratado general de agua y su distribución, Bilbao, España, 1982, Ediciones Urmco.

Romero Rojas Jairo Alberto, "Calidad del agua", México, D. F., 1999, Grupo Editor Alfaomega.

Steel Ernest y McGhee Terence, "Abastecimiento de agua y alcantarillado", Barcelona, España, 1972, Editorial Gustavo Gili.

S. A. R. H. "Perforación de pozos profundos", México, D. F., noviembre de 1980. Plan nacional de obras hidráulicas y de ingeniería agrícola para el desarrollo rural.

Tinajero González Jaime, "Apuntes de aspectos fundamentales en el estudio del agua subterránea (geohidrología)", México, D. F., junio de 1994, departamento de publicaciones de la Facultad de Ingeniería, U. N. A. M.

Todd David Keith, "Hidrología", Madrid, España, 1975, Editorial Paraninfo.

Trujillo Candelaria Jorge, "Perforación de pozos para agua", 3 tomos, México, D. F., 1984, división de educación continua, Facultad de Ingeniería, U. N. A. M.

Vargas Alcántara Vicente, "Técnicas y análisis de costos de pozos profundos y aguas subterráneas", México, D. F., julio de 1976, Editorial Limusa.

GLOSARIO.

Agua insalubre. Agua cuya ingestión daña la salud.

Agua salobre. Agua que debido a su contenido de minerales, tiene sabor a sal.

Anisotropía. Es la propiedad que presentan los estratos, consistente en el cambio de las propiedades, en la dirección que en ellos se considere.

Arenamiento. Se refiere a la introducción de finos y arenas al interior del pozo, que son succionados por la bomba, ocasionándole a ésta desgaste.

Barita. Variedad mineral del sulfato de bario anhidrido ($BaSO_4$); es la principal roca de la que se obtiene mineral de bario. La densidad relativa (peso específico) es de 4.48, alta para un mineral no metálico.

Bidón. Es un recipiente metálico o plástico, con forma cilíndrica o cúbica.

Bomba de desplazamiento positivo. Consta de una pieza giratoria con una serie de aletas que se mueven en una carcasa muy ajustada. En todas estas bombas, el líquido se descarga en una serie de pulsos, y no de forma continua, por lo que hay que tener cuidado para que no aparezcan condiciones de resonancia en los conductos de salida que podrían dañar o destruir la instalación.

Carburo de tungsteno. Abrasivo sintético hecho a base de carbono, presenta la misma dureza que el diamante.

Corrosión. Desgaste total o parcial que disuelve o ablanda los metales, por reacción química o electroquímica con el agua salada.

Desazolve. Se llama así a la maniobra de extraer los lodos, arenas, gravillas, etc., del interior del pozo, durante la limpieza primaria, el desarrollo y al término de éste.

Dique (geología). Intrusión con forma de muro de roca ígnea que atraviesa otros estratos preexistentes. Se forma a partir de una corriente de roca fundida que, tras penetrar en una fisura, se enfría y solidifica. El material rocoso de los diques suele ser más duro que el de las rocas circundantes.

Engravado. Se conoce con este nombre, al conjunto de operaciones que se efectúan para colocar grava en el espacio anular, entre la tubería y las paredes de la perforación, para la formación del filtro.

Enjarre. Es la consistencia que le proporcionan los lodos a las paredes de la perforación, esta consistencia proporciona una especie de ademe provisional, evitando los derrumbes y el flujo del agua de los acuíferos hacia el pozo.

Estratigrafía. Rama de la geología cuya finalidad es el estudio de las rocas vistas como capas o estratos. Centrada en especial en las rocas sedimentarias, la disciplina se ha extendido a todos los tipos de rocas.

Estrato de andesitas. Andesita, roca volcánica oscura, de grano fino, de composición intermedia entre el basalto y la riolita, la andesita se compone en su mayor parte de feldespato plagioclasa y cantidades menores de biotita.

Estrato de areniscas. Arenisca, roca sedimentaria con granulado grueso formado por masas consolidadas de arena. Su composición química es la misma que la de la arena; así, la roca está compuesta en esencia de cuarzo. El material cimentador que mantiene unidos los granos de arena suele estar compuesto por sílice, carbonato de calcio u óxido de hierro.

Estrato de basalto. Basalto, es la variedad más común de roca volcánica. Se compone casi en su totalidad de silicatos oscuros de grano fino, sobre todo feldespato, piroxeno, plagioclasas y magnetita.

Estrato de calcita. Calcita, mineral compuesto principalmente de carbonato de calcio (CaCO_3). Después del cuarzo, es el más abundante de todos los minerales de la Tierra.

Estrato de caliza. Caliza, tipo común de roca sedimentaria, compuesta por calcita (carbonato de calcio, CaCO_3). Cuando se calcina (se lleva a alta temperatura) da lugar a cal (óxido de calcio, CaO). La caliza cristalina metamórfica se conoce como mármol.

Estrato de conglomerados. Conglomerado (geología), roca sedimentaria formada por fragmentos y grava. Los fragmentos con diámetro entre 2 y 4 mm se llaman gravillas; las guijas tienen entre 4 y 64 mm; los guijarros entre 64 y 256 mm; los cantos tienen más de 256 milímetros.

Estrato de cuarzo. Cuarzo, es el mineral más común, compuesto por dióxido de silicio (SiO_2) o sílice. Distribuido por todo el mundo como componente de rocas o en forma de depósitos puros, es un constituyente esencial de las rocas ígneas, como el granito y la riolita, que contienen un exceso de sílice. En las rocas metamórficas, es un componente principal de distintos tipos de esquisto; la roca metamórfica llamada cuarcita se compone casi en su totalidad de cuarzo.

Estrato de esquistos. Esquisto, término aplicado a cualquiera de las rocas metamórficas cuyos cristales, en general los del mineral más abundante, están alineados en capas paralelas formando un gran número de divisiones compactas y bien desarrolladas. Las rocas esquistosas se rompen con facilidad en placas finas parecidas a escamas.

Estrato de granito. Granito, roca ígnea con formación y textura cristalina visible. Se compone de feldespato, cuarzo, con una cantidad pequeña de mica y de algunos otros minerales accesorios como circón, apatito, magnetita.

Estrato de lignita. Lignita, variedad de carbón. Desde el punto de vista geológico, el lignito es de origen reciente pues se encuentra en los estratos del cretácico y del terciario.

Estrato de margas. Marga, depósito de carbonato de calcio amorfo, arcilla y arena en diversas proporciones.

Estrato de pirita. Pirita, mineral compuesto por sulfuro de hierro, FeS_2 , mineral sulfurado más común. Cristaliza en el sistema cúbico y se encuentra, con frecuencia, en forma de cristales bien definidos tanto como en formaciones masivas.

Estrato de pizarras. Pizarra, roca fósil y densa con grano fino, formada por el metamorfismo de esquisto micáceo, arcilla o, con menor frecuencia, de rocas ígneas. El proceso de metamorfismo produce la consolidación de la roca original y la formación de nuevos planos de división en los que la pizarra forma láminas características, finas y extensas. La pizarra auténtica es dura y compacta, no sufre meteorización apreciable.

Estrato de riolitas. Riolita, roca volcánica clara de grano fino, encontrada sobre todo en la lava volcánica. Su composición química es idéntica a la del granito, está compuesta en esencia por feldespato y cuarzo.

Estrato de serpentina. Serpentina, mineral común y muy difundido compuesto por silicato de magnesio hidratado, $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Se denomina así por las bandas verdes parecidas a serpientes que tienen las variedades abundantes. La variedad laminar tiene un lustre graso y fibroso.

Espacios intergranulares. Son los espacios existentes en el subsuelo entre las partículas de rocas que forman a éste, en los acuíferos estos espacios contienen agua.

Evapotranspiración. Pérdida de agua del subsuelo por evaporación del nivel de aguas freáticas y por transpiración en las plantas.

Filón. Son estructuras de cuarzo y otros materiales, se forman cuando se inyectan fluidos magmáticos en fisuras abiertas, por intrusión de cuerpos grandes de roca ígnea, al solidificarse se forman capas estratificadas muy juntas.

Formaciones subyacentes. Son los estratos que se encuentran en el nivel inferior del estrato en estudio. En caso del tapón de fondo son las formaciones que se encuentran por debajo de dicho tapón.

Gel intersticial. Es la mezcla de agua con arcilla que ocupa los espacios existentes en el filtro y las formaciones perforadas, durante la construcción y terminación del pozo.

Geófono. Instrumento que detecta las ondas sísmicas, que los terremotos o explosiones generan en la tierra. Estrictamente hablando, un geófono es un aparato que simplemente detecta las ondas, mientras que un sismógrafo las detecta y las graba.

Incrustación. Es el efecto que tienen los minerales contenidos en el agua, de formar una superficie dura en las aberturas de la tubería productora.

Inhibidor. Sustancia que detiene o evita una reacción química.

Intersticios. Son los espacios existentes entre las partículas del subsuelo, que son ocupados por agua, bajo el nivel de aguas freáticas.

Isotropía. Fenómeno por el que ciertos cuerpos presentan una o más propiedades que no dependen de la dirección en que éstas se midan. Un sistema constituido por varias sustancias, o por una sola, es homogéneo cuando sus propiedades son idénticas en todas sus partes. Es heterogéneo cuando no cumple esta condición.

Mantos atravesados. Se refiere a los acuíferos perforados durante la realización del pozo.

Material detrítico. Son consideradas las arenas y gravas finas, en forma de abanico o cono, a modo de delta; depositados por una corriente de agua, en el punto donde abandona un valle angosto que atraviesa un macizo montañoso y se abre a una llanura o valle principal.

Movimiento recíprocante. Se refiere a la acción descendente-ascendente del émbolo, lo cual provoca un efecto de compresión y tensión respectivamente, en el interior del pozo, durante el lavado primario con equipo de percusión tipo pulseta.

Salmuera. Agua con alto contenido en minerales, tales como azufre, sodio, calcio; ya sean combinados o por separado.

Sublimación. Cambio de una sustancia del estado sólido al vapor sin pasar por el estado líquido.

Sumergencia. Es la longitud de tubería de inyección de aire, desde el nivel estático del agua hasta la salida del aire dentro del acuífero.

Prospección. Exploración y sondeos previos de un terreno para reconocer sus posibilidades mineras, en este caso, las posibilidades de localizar acuíferos.

Tubería ciega. Es en la que no se han realizado, aberturas en las paredes del cilindro que la forma.

Tubería eductora. Es la tubería que descarga la emulsión agua-aire, durante la realización del desarrollo y el aforo.