

VI. - TRATAMIENTO DESDE EL PUNTO DE VISTA GEOHIDROLOGICO.

6.1. - HIDRAULICA DE POZOS. -

No obstante que los primeros estudios del flujo del agua a través de tubos capilares por Hagen y Poiseville indicaron que el gasto es proporcional al Gradiente Hidráulico, fué Darcy quien confirmó esta ley y la aplicó al flujo de agua por percolación a través de filtros de arena.

La ley de Darcy se expresa como sigue:

$$V = K i \quad (1)$$

V = Velocidad del agua en m./seg.

K = Permeabilidad del terreno en m³/seg. - m²

i = Gradiente Hidráulico en m./m.

La expresión de la fórmula de Darcy en investigaciones de aguas subterráneas se ha generalizado pero usándola con una pequeña variante: K es la permeabilidad del suelo, significando el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo en una muestra de suelo cuya sección transversal de circulación sea de 1.00 m² y esté bajo la acción de un Gradiente Hidráulico de 1 m./m. Si esta unidad de permeabilidad la multiplicamos por el espesor del acuífero, obtendremos un término de la permeabilidad también que denominaremos por T (transmisibili-

dad) cuya interpretación sería: T es el volumen de agua por unidad de tiempo que pasa a través de un área de 1.00 m de ancho y b metros de profundidad de un acuífero siendo b el espesor del mismo.

$$T = K b \quad (2)$$

basándonos en esta ecuación, entrando de nuevo a la ley de Darcy que daría:

$$v = \frac{T i}{b} \quad (3)$$

y expresándolo ahora en función del gasto

$$Q = \frac{T i}{b} W b = T i W \quad (4)$$

donde W es el ancho de la franja de acuífero que se analiza.

6.1.1.- FLUJO ESTABLECIDO.- Trataremos de encontrar la expresión para la obtención de la transmisibilidad en base a las siguientes suposiciones:

- (1) El acuífero es homogéneo, es isotrópico y de área infinita.
- (2) El pozo penetra totalmente el espesor del acuífero.
- (3) El coeficiente de transmisibilidad es constante en todos los lugares y en cualquier momento.
- (4) El bombeo sobre el pozo se ha prolongado a gasto constante el tiempo suficiente para que el sistema hidráulico alcance la etapa de e-

equilibrio o condición de flujo establecido.

(5) Las líneas de flujo son radiales.

(6) El flujo es laminar.

Ver figura No. 2.

usando coordenadas cilíndricas, denominaremos r el radio de cualquier cilindro, h como la altura del cono de depresión a una distancia r del pozo entonces

$$i = \frac{dh}{dr} \quad (5)$$

y el area de flujo será

$$A = 2\pi r h \quad (6)$$

substituyendo en la ley de Darcy

$$Q = KiA = K \frac{dh}{dr} \cdot 2\pi r h \quad (7)$$

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{2\pi K}{Q} \int_{h_1}^{h_2} h dh \quad (8)$$

$$\text{Log} \frac{r_2}{r_1} = \frac{2\pi K}{2Q} \left[h_2^2 - h_1^2 \right] \quad (9)$$

sabemos además que

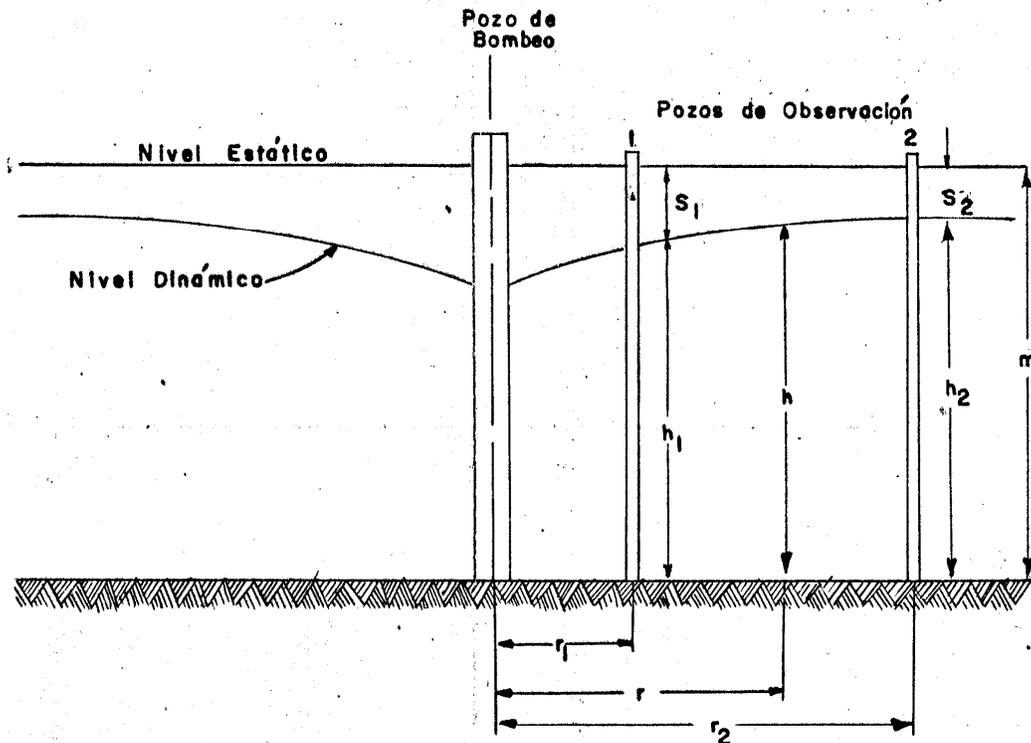


Fig. 2.— ILUSTRACION DE PRUEBA DE BOMBEO CON POZOS DE OBSERVACION.

UNIVERSIDAD DE SONORA
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

ESTUDIO GEOHIDROLOGICO
 DE CABORCA

TESIS PROFESIONAL
 JOSE VALVERDE A.

$$h_2^2 - h_1^2 = (h_2 + h_1) (h_2 - h_1) \quad (10)$$

$$h_2 - h_1 = S_1 - S_2 \quad (11)$$

Si consideramos que el abatimiento es pequeño comparado con el espesor saturado del acuífero, h_2 y h_1 son aproximadamente igual al espesor del acuífero "m", entonces

$$h_2 + h_1 = 2m \quad (12)$$

Substituyendo en la ecuación número (9)

$$\text{Log} \frac{r_2}{r_1} = \frac{\pi K}{Q} (S_1 - S_2) 2m \quad (13)$$

de la definición de transmisibilidad

$$T = Km$$

$$\text{Log} \frac{r_2}{r_1} = \frac{2\pi T}{Q} (S_1 - S_2) \quad (14)$$

despejando T y convirtiendo a logaritmos decimales

$$T = \frac{2.30 \log \frac{r_2}{r_1} Q}{2\pi(S_1 - S_2)} \quad (15)$$

donde T es la transmisibilidad en $m^2/\text{seg.}$, Q la descarga de bombeo en $m^3/\text{seg.}$, r_1 y r_2 las distancias respectivas desde el pozo de bombeo a los pozos de observación número 1 y 2 en m., S_1 y S_2 los abatimientos respectivos del espejo del agua en los pozos de observación 1 y 2.

6.1.2. - FLUJO INESTABLE. - Una aportación importante en hidráulica de pozos fue hecha por Theis en 1935 con el descubrimiento de su fórmula de no equilibrio o de flujo inestable que introduce el factor tiempo o coeficiente de almacenaje que denominaremos S. Esta fórmula fue encontrada por analogía entre el flujo de agua subterránea y el flujo de calor por conducción. Más tarde Jacob demostró esta fórmula usando conceptos hidráulicos directamente.

Ilustraremos a continuación un diagrama de cuerpo libre del sistema de flujo en la vecindad del pozo. Supongamos impermeables los planos frontera del sistema en la parte superior y en el fondo y además el flujo radial. Encontraremos por el principio de la conservación de la masa que la diferencia en el gasto a través de las caras internas y externas de el cilindro deben ser obtenidas de almacenamiento interno del mismo

$$Q_1 - Q_2 = \frac{dv}{dt} \quad (16)$$

De la ecuación (4) de flujo a través de la cara interna del cilindro obtendremos:

$$Q_1 = T_1 W_1 = - 2\pi r T \frac{\partial s}{\partial r} \quad (17)$$

y para la cara externa del cilindro obtenemos

$$Q_2 = - 2\pi (r + dr) T \left(\frac{\partial s}{\partial r} + \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} dr \right) \quad (18)$$

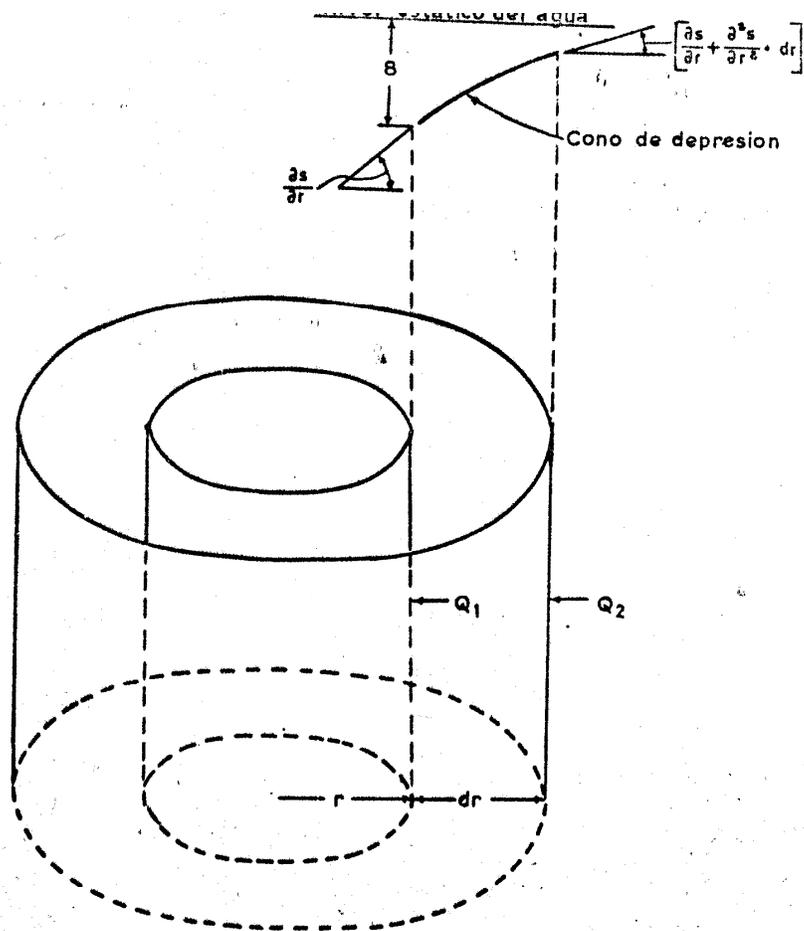


Fig. 3.- DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE 2 SECCIONES CILINDRICAS DEL ACUIFERO.

UNIVERSIDAD DE SONORA
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

ESTUDIO GEOHIDROLOGICO
 DE CABORCA

TESIS PROFESIONAL
 JOSE VALVERDE A.

Para condiciones de acuífero libre definiremos S el coeficiente de almacenamiento como el gasto por unidad de volumen de material del cual fué desalojada el agua.

$$V = 2\pi r (dr) sS \quad (19)$$

derivando con respecto al tiempo

$$\frac{dv}{dt} = 2\pi r dr \frac{\partial s}{\partial t} S \quad (20)$$

substituyendo en la ecuación (16) obtenemos que

$$\begin{aligned} -T \frac{\partial s}{\partial r} 2\pi r + T \left(\frac{\partial s}{\partial r} + \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} dr \right) 2\pi (r+dr) &= 2\pi r dr \frac{\partial s}{\partial t} S \\ -T \frac{\partial s}{\partial r} 2\pi r + T \left[2\pi r \frac{\partial s}{\partial r} + 2\pi r dr \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + 2\pi dr \frac{\partial s}{\partial r} + 2\pi (dr)^2 \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} \right] & \\ &= 2\pi r dr \frac{\partial s}{\partial t} S \end{aligned}$$

dividiendo entre $2\pi r T dr$ y despreciando diferenciales de orden más alto que el primero, tenemos:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (21)$$

Se ha obtenido así la ecuación diferencial para flujo radial de agua en un acuífero. Para un gasto constante la solución de esta ecuación está dada por:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (22)$$

$$\text{en donde } u = \frac{r^2 S}{4 T t} \quad (23)$$

t = Tiempo desde que el bombeo fué iniciado, en días.

Q = Descarga en m³ por día.

La expresión en la ecuación (22) no es directamente integrable como una función elemental pero sus valores pueden ser computados por la siguiente serie

$$\int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = W(u) = -0.577216 - \text{Log } u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} \quad (24)$$

como vemos la expresión integral exponencial la denotamos simbólicamente W (u) a la que generalmente se le llama función de pozo. Existen publicaciones de tablas con valores de esta integral.

De las ecuaciones (22) y (23) se observa que si s puede ser medida para uno o más valores de r y varios valores de t y la descarga es conocida, entonces son perfectamente determinables T y S que son los 2 parámetros característicos de las propiedades permeables e Hidrodinámicas del acuífero.

6.1.3- FORMULA MODIFICADA PARA FLUJO INESTABLE.- Jacob - observó que la suma de los términos posteriores a Log u en la ecuación (24) son despreciables cuando u es pequeño. De la ecuación (23) se nota que u decrece con el tiempo, entonces podemos llevar a cabo pruebas de larga duración o hacer las siguientes simplificaciones:

$$S = \frac{Q}{4\pi T} \quad W(u) = \frac{Q}{4\pi T} \left[-0.5772 - \text{Log } u \right]$$

$$6 \quad S = \frac{Q}{4\pi T} \left[\text{Log} \left(\frac{1}{u} \right) - 0.55772 \right] \quad (27)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad \text{y} \quad \frac{1}{u} = \frac{4Tt}{r^2 S} \quad \text{entonces:}$$

$$S = \frac{Q}{4\pi T} \left[\text{Log} \left(\frac{4Tt}{r^2 S} \right) - 0.5772 \right] \quad (28)$$

Aplicando la ecuación (28) en las mediciones de abatimiento o recuperación del nivel de agua en pozos de observación a una distancia r que será constante vemos que

$$\text{a un tiempo } t_1 \quad S_1 = \frac{Q}{4\pi T} \left[\text{Log} \left(\frac{4Tt_1}{r^2 S} \right) - 0.5772 \right]$$

$$\text{a un tiempo } t_2 \quad S_2 = \frac{Q}{4\pi T} \left[\text{Log} \left(\frac{4Tt_2}{r^2 S} \right) - 0.5772 \right]$$

entonces el incremento de abatimiento de un tiempo t_1 a un tiempo t_2 será

$$S_2 - S_1 = \frac{Q}{4\pi T} \text{Log} \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (29)$$

convirtiendo a la base de logaritmos decimales obtenemos

$$S_2 - S_1 = S = \frac{2.30 Q}{4\pi T} \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (30)$$

despejando transmisibilidad

$$T = \frac{2.30 Q}{4\pi \Delta S} \quad (31)$$

donde ΔS será el incremento de abatimiento medido en un ciclo decimal de unidades de tiempo ya que $\log 10 = 1$.

Para obtener "S" el coeficiente de almacenamiento se resuelve la ecuación (28) para $s = 0$ y obtenemos

$$S = \frac{2.25 T t_0}{r^2} \quad (32)$$

Hasta aquí se han obtenido expresiones bastante simplificadas, de los parámetros T y S. Con una buena distribución de pozos de prueba sobre la zona de estudio se pueden obtener las características mencionadas, y bajo el análisis minucioso de todos estos valores, complementando con el conocimiento geológico de las diferentes zonas se puede inferir valiosa información.

6.2.- ETAPA ACTUAL DE LA INVESTIGACION EN PRUEBAS DE BOMBEO.

Las pruebas de bombeo en pozos seleccionados se llevaron a cabo en diferentes partes de la región. Estas pruebas de corta duración que fueron en su mayoría de abatimiento y recuperación, muestran una gran variación en las transmisibilidades debido sin duda a los cambios vertical y lateral en la composición de los acuíferos.

En los acuíferos aluviales solamente realizando un gran número de pruebas de bombeo en una red de pozos poco espaciados, se puede esperar obtener las características medias de los acuíferos en una zona.

El número restringido de pruebas de bombeo que se han llevado a cabo hasta ahora en pozos muy distantes, solamente dan valores ais

lados cuyo significado, para una zona completa, no se ha supuesto.

En general se obtuvieron bajas transmisibilidades del orden de pocos cientos de m^2/dia en la zona costera y en los valles del area Asunción.

En el area del Coyote, en el valle de Bisani y en algunas partes de la zona costera se obtuvieron valores intermedios y altos, del orden de algunos miles de m^2/dia .

En el valle Llano Blanco, al oriente de Pitiquito se obtuvieron valores muy altos de transmisibilidad, del orden de miles a diezmiles m^2/dia .

Como puede verse las transmisibilidades pueden variar grandemente en la misma area de un pozo a otro lo que señala la necesidad de efectuar muchas pruebas de bombeo adicionales, para obtener una mayor significación regional de los resultados.

6.2.1.- ACUIFEROS DE LA CUENCA DE CABORCA.- Existe en toda la cuenca un acuífero regional compuesto de formaciones aluviales no consolidadas.

El acuífero alcanza su máximo espesor en el valle de Bisani, con más de 150 metros y es relativamente delgado en la parte poniente de la planicie costera; cerca de la costa del Golfo es menor de 40 metros, su sección saturada varía de 80 a 100 metros en la cuenca Asunción, a menos de 20 metros, en algunas partes de la zona costera.

6.2.2.- NIVELES DE AGUA.- Las elevaciones del Nivel de Agua referidas al nivel del mar varían de 290m., en Pitiquito a 250m., en Caborca, 150m., en el valle de Bisani Central, y 0m., a una distancia de 7 a 10 Kms., de la costa. En la franja de la Costa al poniente de esta línea los niveles están bajo cero.

Existen dos depresiones del nivel de aguas subterráneas en la planicie costera, una al norte con niveles hasta -4.0m., bajo nivel del mar y otra en la zona del desemboque con -8.0m., de elevación.

6.2.3.- DIRECCIONES DE FLUJO.- Dado que actualmente se encuentra trabajando, con observaciones piezométricas periódicas, solo en pozos abandonados que se encuentran bastante esparcidos sobre la región solo se mencionará el flujo de aguas subterráneas en términos muy generales.

El flujo principal de entrada se recibe en la dirección Pitiquito-Caborca, continúa paralelo al cauce del Rio Asunción derivándose al sur por los valles de Pitiquito, Caborca, Arrojos y Bisani y siguiendo al poniente por el area estrecha del Pasaje del Coyote para ser conducido por toda la Planicie Costera.

En las areas de los valles de Caborca, los Arrojos y en el area del Coyote se observan gradientes muy pronunciados, siendo más graves en el valle de Bisani y en la Planicie Costera.

El acuífero es freático y se recarga directamente por corrientes, infiltración de lluvias y en parte por percolación de las aguas de riego. Este acuífero es el que actualmente se encuentra en explotación.

Recientemente, se han recibido indicaciones de la existencia de acuíferos confinados profundos, por medio de pozos profundos nuevos, en el valle de Bisani, el área del Coyote y la Planicie Costera. (Pozo Venegas, Pozo Carrillo y Pozo Arrizon.)

En resumen puede decirse que en los primeros pozos profundos en la costa y en los valles interiores, se encontraron nuevas formaciones que contienen agua. Si estos son realmente acuíferos de cierta magnitud deberá estudiarse y probarse por medio de pozos profundos de investigación.

6.3.- DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MODELO MATEMÁTICO.

La ley de Darcy que sirve de apoyo a la gran mayoría de los estudios teóricos de flujos de agua en medios porosos permite, con las configuraciones piezométricas y los resultados obtenidos de pruebas de bombeo efectuadas en números y distribución convenientes, calcular los caudales que fluyen por los acuíferos.

Si en una sección vertical de acuífero el área es igual a la longitud considerada en planta multiplicada por el espesor del mismo, el flujo en

la sección descrita será igual a la longitud en planta multiplicada por la transmisibilidad y por la componente normal del gradiente piezométrico. El flujo por supuesto ocurre siempre en la dirección en que disminuye el potencial.

De acuerdo con lo anterior, es necesario conocer tres elementos a lo largo de toda la frontera exterior de una región dada para poder calcular los flujos de entrada y salida que ocurren a través de la misma. Dichos elementos son la transmisibilidad, el gradiente y la longitud.

La transmisibilidad se obtiene mediante pruebas de bombeo, como ya se mencionó, el gradiente se obtiene de las configuraciones piezométricas y la longitud, de los planos topográficos sobre los cuales se efectúan dichas configuraciones.

En las pruebas de bombeo, además de la transmisibilidad se determina invariablemente el coeficiente de almacenaje pues es de utilidad ya que la diferencia existente entre entradas y salidas de aguas subterráneas, es precisamente la variación habida en el almacenamiento dentro de los límites de la región. Expresado esto, en forma analítica constituye la ECUACION DE EQUILIBRIO DINAMICO.

Si la región en estudio se fracciona en un gran número de subregiones, adoptando para cada una, sus propiedades hidrodinámicas medias, el establecimiento de la ecuación de equilibrio dinámico para todas y cada una

de las subregiones conduce al establecimiento de un sistema de ecuaciones en el cual las incógnitas serán los flujos de entrada a cada subregión. Resolviendo este sistema de ecuaciones obtendremos la cuantificación y localización de las recargas recibidas por el acuífero. El tipo de recargas que puede recibir el acuífero son de tres tipos: Horizontal subterránea, Vertical por infiltración directa de lluvia sobre el lugar y percolación de aguas de riego, y Vertical subterránea de interconexión con acuíferos más profundos.

Conociendo los registros pluviométricos históricos en la región, se puede estimar probabilísticamente la infiltración por lluvia. Teniendo la información geológica del lugar podemos inferir las posibles zonas de recarga Vertical por acuíferos inferiores y su cuantificación. La recarga Horizontal subterránea quedará como la única incógnita que puede ser resuelta por un sistema de ecuaciones en un modelo matemático, en el que se tomen en cuenta los datos de pluviometría y recarga vertical.

Cabe mencionar que existen otros tipos de modelos en los cuales se introducen datos inclusive de recarga Horizontal subterránea, los cuales requieren de un estudio mucho más profundo de hidrología superficial y evapotranspiración, para lo cual se han elaborado tres teorías: Climatológicas (la de Thornthwaite por ejemplo) de flujo base (Kraijenhoff) y una de escurrimiento superficial (hidrógrafo unitario). Este tipo de modelos, llamados integrales requieren de una buena cantidad de datos históricos de registros hidrológicos (pluviométricos, evaporación, etc.) y de extracciones con objeto de calibrar el modelo.

Se estima que en regiones como la de Caborca, en que no se cuenta con registros directos de mucha antigüedad, el problema debe ser tratado, desde un punto de vista exclusivo de la Hidrología Subterránea, como ya se mencionó. Pero es conveniente llevar a cabo la calibración del modelo, mediante la historia informativa de registros disponible.

6.4.- ESPECIFICACIONES GENERALES.-

A continuación se transcriben las especificaciones oficiales usadas en la Residencia de Aguas Subterráneas de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, en todos los trabajos de perforaciones exploratorias efectuados.

6.4 1.- ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA PERFORACION Y CORTE DE TERMINACION DE POZOS.-

1.- EQUIPO DE PERFORACION.-

- 1.1.- Para la perforación de pozos podrán emplearse equipos de percusión y equipos rotatorios, sean de circulación directa o inversa.
- 1.2.- El equipo empleado en cada caso, deberá tener la capacidad suficiente para alcanzar la profundidad que se especifique con el diámetro de barrena que se señale.
- 1.3.- Podrán utilizarse lodos bentoníticos de perforación, procurando que su viscosidad sea la menor posible.
- 1.4.- Los equipos de perforación deberán estar provistos de un calibrador de diámetro de perforación.
- 1.5.- Los equipos de percusión deberán estar provistos de cucharas de charnela.

2. - PROGRAMA DE PERFORACION. -

2.1. - Se iniciará la perforación con un diámetro reducido, llevándola hasta la profundidad que señale la Residencia General de Aguas Subterráneas.

2.2. - Durante la perforación deberá llevarse un registro cuidadoso de la resistencia a la penetración.

Si el equipo es de tipo de percusión, esta resistencia se medirá por el número de golpes dados para avanzar cada metro. Para esto, la máquina deberá estar provista de un contador de golpes acoplado al sistema elevador.

Si el equipo es de tipo rotatorio, la resistencia a la penetración se medirá por el tiempo efectivo de trabajo para avanzar cada metro.

2.3. - Una vez alcanzada la profundidad total del pozo, y si a criterio de la Residencia de Aguas Subterráneas es conveniente, se correrá en él uno o varios registros que podrán ser: eléctrico, de rayos gama, de neutrones, sónico o de molinete hidráulico.

3. - MUESTREO. -

3.1. - Durante la perforación deberán obtenerse muestras de los materiales atravezados, con la frecuencia que en cada caso

se especifique. Esta frecuencia podrá variar entre cada metro y cada cinco metros de avance de la perforación. Además se tomarán muestras adicionales en los cambios de formación. Las muestras obtenidas deberán guardarse en frascos de vidrio o en bolsas de plástico adecuadas, etiquetándolas con el nombre o número de identificación del pozo; número progresivo de la muestra y profundidad a la que corresponde.

3.2. - Para obtener cada muestra, se procederá en la siguiente forma:

a). - Si el equipo de perforación es de tipo percusión, una vez alcanzada la profundidad de muestreo se limpiará la perforación con la cuchara de charnela, hasta que se elimine en todo lo posible el material de corte y quede el agua relativamente limpia. A continuación se golpeará con la cuchara el fondo de la perforación a fin de que se extraiga material original del fondo al penetrar parcialmente en éste.

b). - Si el equipo es rotatorio de circulación inversa, la muestra se tomará directamente en la descarga del retorno de la circulación, utilizando para esto una malla suficientemente cerrada.

c). - Si el equipo es rotatorio de circulación directa, al llegar a la profundidad de muestreo se interrumpirá la perforación, dejando circular el fluido hasta que haya arrastrado todo el ma

terial ya cortado y salga limpio. A continuación se proseguirá la perforación y se tomará la muestra de canal con el primer material cortado que llegue.

3.3.- Cuando se sospeche la existencia de acuíferos salinos, deberá muestrearse el agua durante la perforación con los intervalos que se especifiquen, pero que en ningún caso excederán de diez metros.

Cada muestra de agua se tomará antes de la muestra correspondiente de la formación. Para esto, se retirará la herramienta de perforación y se limpiará perfectamente el pozo con cuchara de charnela. A continuación se introducirá hasta el fondo de la perforación un muestreador de agua profunda con capacidad de un litro o mayor. La muestra así obtenida se vaciará en un frasco de un litro o más de capacidad, vertiendo el agua directamente del muestreador y tomando previamente la temperatura y el pH del agua.

3.4.- Con las muestras de los materiales cortados durante la perforación y con el auxilio de los registros que se hayan corrido de acuerdo con el inciso 2.5, la Residencia General de Aguas Subterráneas formará el corte geológico definitivo y el proyecto de terminación del pozo. Para esto se tomará cuenta el resultado de los análisis de las aguas muestreadas.

4. - REGISTRO DE PERFORACION. -

- 4.1. - Durante la perforación de cada pozo de explotación, deberá -
llevarse un registro cuidadoso en las formas aprobadas por la
S. R. H. En dichos registros deberá consignarse:
- a). - Clase, marca y tipo del equipo de perforación.
 - b). - Nombre o número de identificación del pozo.
 - c). - Zona a la que pertenece.
 - d). - Fecha y hora de iniciación y de terminación de cada tur-
no de trabajo.
 - e). - Horas efectivas de trabajo en cada turno. Suspensiones
ocurridas y causas que las motivaron.
 - f). - Profundidad a la que se encontró el nivel freático.
 - g). - Nivel del agua en el pozo al iniciar y terminar cada tur-
no de trabajo.
 - h). - Número de golpes dados para avanzar cada metro de per-
foración en el caso de equipo de percusión. Si el equipo -
es rotatorio, tiempo empleado para avanzar cada metro.
En ambos casos se anotará el peso aproximado de la he-
rramienta de perforación.
 - i). - Número progresivo de cada muestra obtenida, anotando
la profundidad a la que corresponde y el material de que
se trata, según clasificación de campo.
 - j). - Todas aquellas observaciones adicionales que puedan pro

porcionar información respecto al comportamiento de la perforación, tales como variaciones bruscas del nivel del agua, consumo de circulación, derrumbes, etc.

5.- TERMINACION DE LOS POZOS.-

- 5.1.- Una vez determinado el corte geológico con las muestras de las formaciones geológicas obtenidas durante la perforación, el Residente hará el proyecto de ademado del pozo, indicando en qué tramo o tramos deberán quedar ubicados los cedazos y cual o cuales llevarán ademe ciego. Asimismo definirá que parte del ademe ciego deberá cementarse, teniendo en cuenta la calidad de las aguas en los diversos acuíferos.
- 5.2.- Los cedazos serán troquelados, quedando a juicio de la Secretaría la elección del tipo que se emplee en cada caso.
- 5.3.- El ademe se formará con tramos completos de tubería y de cedazos, soldados a tope.
- 5.4.- La tubería deberá entrar holgada en la perforación y podrá girar libremente cuando esté suspendida.
- 5.5.- La verticalidad del ademe en la zona correspondiente a la cámara de bombeo, tendrá una tolerancia de dos tercios del diámetro del ademe por cada treinta metros de profundidad, siempre y cuando la inclinación con respecto a la vertical no sobrepase $1/2^{\circ}$ (medio grado) por cada cien metros de profundidad.

5.6.- Una vez instalado y centrado correctamente el ademe en la perforación, se procederá a colocar el filtro de grava en el espacio anular entre la perforación y el tubo, en las zonas de terminadas en el proyecto del pozo.

Para formar el filtro se vaciará la grava en el espacio anular, haciéndolo en forma relativamente lenta para evitar "punteos". El descenso de la grava se verificará frecuentemente con una sonda adecuada.

Para facilitar y activar el acomodo de la grava, se pistoneará el pozo periódicamente.

5.7.- La grava estará lavada, será redondeada y del calibre que se especifique en cada caso. Como norma general, se considerará que el diámetro de la grava estará comprendido entre 12.7 mm. (1/2") y 6.3 mm. (1/4").

5.8.- Una vez terminado de colocar el filtro de grava, se procederá a cementar las zonas proyectadas. En caso de que la parte superior de la tubería quede cementada, se colocará previamente tres tubos engravadores con diámetros de 50.8 mm. (2") a 76.2 mm. (3") según el caso soldándolos al ademe. Estos tubos engravadores tendrán su boca inferior a una profundidad ligeramente inferior que el fondo de la cementación.

5.9.- Después de realizar las operaciones de limpieza y desarrollo

y aforo de los pozos, el equipo de bombeo deberá quedar provisto de una tubería de plástico con diámetro mínimo de 25.4 mm. (1") acoplada a la columna de succión que servirá para introducir la sonda eléctrica o neumática. La longitud de esta tubería será suficiente para que su boca inferior quede inmediatamente arriba del cuerpo de tazones a la vez que se dejará colocada de tal manera que en cualquier momento pueda ser sondeado el pozo.

6.4.2.- ESPECIFICACIONES PARA EL DESARROLLO Y AFORO DE LOS POZOS.

Una vez instalados el pozo de bombeo, se procederá en la siguiente forma:

- 6.1.- Se hará un croquis de la zona comprendida en un radio de un kilómetro alrededor del pozo, en el cual se anoten los siguientes datos:
 - 6.1.1.- Ubicación aproximada de ríos, arroyos, manantiales, lagunas y zonas pantanosas.
 - 6.1.2.- Ubicación de pozos y norias existentes en esa área.
- 6.2.- Se formará un catálogo con los datos generales de los pozos indicando en 1.1.2, conteniendo primordialmente, el diámetro y profundidad de cada pozo; la profundidad de los niveles estático y dinámico del agua; el régimen de bombeo de cada uno o

sea el caudal que se bombea y horas en que se opera cada pozo durante el tiempo que duren los aforos y pruebas de bombeo que motivan el presente instructivo.

6.3.- Se determinará por métodos topográficos, la posición relativa del pozo de bombeo con las estaciones piezométricas o pozos de observación que se utilicen durante el aforo y pruebas de bombeo. También se efectuará una nivelación diferencial entre esos mismos pozos.

6.4.- Se estudiará la forma de desaguar fácilmente el caudal que se bombée, hasta una distancia mayor de 100 m. del pozo de bombeo y de los de observación o estaciones piezométricas instalando los dispositivos necesarios para ese fin. En el caso de suelos permeables, la distancia será mayor y a juicio de la Residencia de Aguas Subterráneas.

7.- LIMPIEZA Y DESARROLLO DE LOS POZOS.-

7.1.- Terminado de instalar el pozo, se procederá a limpiar perfectamente el interior del mismo, extrayendo todos los materiales y lodos que hayan quedado procedentes de la perforación y maniobras de engravado y cementación.

Esta labor se ejecutará mediante cuchareo cuando el equipo sea de percusión o mediante circulación de agua limpia con la bomba de lodos cuando el equipo sea rotatorio.

7.2.- A continuación y si el caso lo requiere, se efectuará un tratamiento a base de dispersores de arcillas, siguiendo la secuencia que marque el instructivo del fabricante. Este tratamiento podrá auxiliarse con aplicaciones de hielo seco, con cargas variables desde 50 (cincuenta) Kg. hasta 500 (quinientos) Kg.

7.3.- Una vez terminado el tratamiento anterior, se procederá a "pistonear" el pozo, utilizando un pistón debidamente ajustado al diámetro del ademe por medio de empaques de hule o cuero, a fin de realizar una agitación enérgica.

La maniobra de agitación deberá iniciarse efectuando durante un tiempo razonable el movimiento recíprocante del pistón en la parte baja del pozo. Esta operación se repetirá elevando de diez en diez metros el pistón, hasta alcanzar la tubería ciega superior del pozo o bien el nivel estático del agua.

Periódicamente, mediante cuchareo, se limpiará el pozo de los sedimentos que tenga.

7.4.- Una vez terminada la limpieza del pozo, se dejará reposar durante varios días con objeto de que el agente dispersor de arcillas complete su acción.

7.5.- A continuación se sujetará el pozo a un bombeo de desarrollo utilizando un equipo con capacidad suficiente para extraer el caudal que en cada caso se indique.

El equipo de bombeo deberá estar provisto de los siguientes accesorios:

a).- Una tubería de plástico con diámetro mínimo de 25.4 mm. (1") acoplado a la columna de succión, que servirá para introducir la sonda eléctrica o neumática. La longitud de esta tubería será suficiente para que su boca inferior quede inmediatamente arriba del cuerpo de tazones.

b).- Un orificio calibrado para aforo, provisto de su respectivo piezómetro y curva de calibración.

c).- Tubería adicional para alejar el caudal que se extraiga del pozo, cuando no se tengan facilidades para el drenaje de las zonas o cuando su posible reinfiltración al subsuelo pueda alterar las lecturas piezométricas.

7.6.- Se tomarán los niveles estáticos en el pozo de bombeo en los de observación y a continuación se iniciará el bombeo con el caudal menor de que sea capaz el equipo utilizado y se irá incrementando por etapas hasta alcanzar el máximo caudal posible. Cada etapa durará hasta que el agua salga limpia, es decir, sin sólidos en suspensión, durante una hora, salvo la etapa de caudal máximo en que la duración en que debe salir el agua completamente limpia será de dos horas.

Se dará por terminado el desarrollo del pozo si al terminar la última etapa y provocar posteriormente cambios bruscos de caudal, el agua no presenta turbiedades.

7.7.- En caso de que se cuente con uno o más pozos de observación en vez de estaciones piezométricas, se limpiarán en la misma forma que el de bombeo. Si el diámetro de los pozos de observación no permite bombearlos, se emplearán cargas de hielo seco combinadas con el pistoneo, para lograr limpiarlos convenientemente.

7.8.- Después de terminar el desarrollo se observarán los niveles, dejando descansar el pozo el tiempo necesario para tener por lo menos un 80% de recuperación en los mismos. Durante este tiempo, se harán lecturas cada dos horas. La Residencia de Aguas Subterráneas decidirá si el mismo equipo debe continuar las pruebas o si puede adoptarse un equipo de menor capacidad para las mismas. El Ingeniero Residente fijará la fecha y hora de iniciación del aforo subsecuente, debiendo dicho aforo ser iniciado siempre entre las ocho y las doce horas del día. Los caudales para el aforo se fijarán de acuerdo con el inciso 3.3.

8.- PRUEBA DE AFORO.-

Una vez efectuadas las observaciones previas descritas, se procederá a efectuar el aforo con la secuela siguiente:

8.1.- El equipo para el aforo deberá ser capaz de proporcionar 150

l.p.s. a 75 m. de profundidad, a menos que la información del desarrollo, a juicio del Ingeniero Residente, indique que el pozo no es capaz de proporcionar dicho caudal con el nivel dinámico a la profundidad mencionada. En tal caso, se puede elegir un equipo para tal caudal y profundidad. Si el equipo y el pozo pueden dar más de 150 l.p.s. con un nivel dinámico no más profundo de 75.0 m., se adoptará el caudal máximo que el equipo pueda sostener en forma constante durante 48 horas.

8.2.- Inmediatamente antes de iniciar el aforo, se medirán las profundidades del nivel estático en los pozos de bombeo, en los de observación y en todos los piezómetros de la o las estaciones piezométricas existentes, anotando las lecturas con la fecha y hora en que se hicieron.

8.3.- Se elegirán dentro del campo de bombeo posible, cuatro valores de caudal, mismos que se llevarán a efecto, uno tras otro, en sucesión creciente primero y decreciente después, según se indica a continuación:

Primer Caudal	6 horas
Segundo Caudal	6 horas
Tercer Caudal	6 horas
Cuarto Caudal	6 horas
Quinto Caudal: * Tercer Caudal:	6 horas
Sexto Caudal: * Segundo Caudal:	6 horas

Séptimo Caudal: = Primer Caudal: 6 horas

Se entiende en lo anterior, que los caudales son crecientes - del primero al cuarto, siendo la duración total del bombeo de 42 horas.

6.4.- Las observaciones se harán a la 1/2 hora, a las tres horas y a las cinco 1/2 horas a partir de cada cambio de caudal. Las lecturas se harán en el pozo de bombeo y en los de observación o estaciones piezométricas, si las hubiera. Las únicas excepciones al ritmo de lecturas mencionadas será durante el primer caudal y durante el quinto caudal, en los que se harán lecturas al ritmo de prueba de bombeo siguiendo instrucciones del Ingeniero Residente.

6.4.3.- ESPECIFICACIONES PARA PRUEBAS DE BOMBEO.-

Después del desarrollo y aforo del pozo y una vez transcurridas las 24 horas o más que se dejan para la recuperación de los niveles estáticos, se procederá a efectuar la prueba de bombeo.

La prueba de bombeo tendrá una duración total de 192 horas. Inicialmente se hará un bombeo continuo y constante durante 96 horas, para medir los abatimientos del nivel piezométrico inducido en los pozos de la prueba. En las 96 horas restantes a partir de la suspensión del bombeo, se medirán las recuperaciones del nivel del agua dentro de los mismos pozos. Dichos pozos son: el de explotación, el o los testigos y/o los piezométricos previamente perforados de acuerdo con las especificaciones correspondientes.

pondientes.

El bombeo durante la primera etapa de la prueba será a caudal constante; que en cada caso señalará el Ingeniero Residente. Durante ese lapso se harán lecturas de profundidad de nivel del agua en todos y en cada uno de los pozos, debiendo efectuarse una medición inicial inmediatamente antes de principiar el bombeo y las lecturas posteriores a los tiempos que en seguida se anotan, medidos a partir del instante en que se inicia el bombeo:

<u>LECTURAS</u>	<u>EFECTUAR A LOS</u>	<u>A PARTIR DE:</u>
Lectura inicial	Inmediatamente antes de iniciar el bombeo	
2a. lectura.	15 segundos	iniciación del bombeo
3a. "	30 "	" " "
4a. "	1 minuto	" " "
5a. "	2 minutos	" " "
6a. "	4 "	" " "
7a. "	8 "	" " "
8a. "	15 minutos	" " "
9a. "	30 "	" " "
10a. "	1 hora	" " "
11a. "	2 horas	" " "
12a. "	4 "	" " "
13a. "	8 "	" " "
14a. "	16 "	" " "
15a. "	24 "	" " "
16a. "	32 "	" " "
17a. "	40 "	" " "
18a. "	48 "	" " "
19a. "	96 "	" " "

Al final de las 96 horas se suspende el bombeo repitiendo, a partir de ese instante, el ritmo de lecturas ya anotado esto es:

<u>LECTURAS</u>	<u>EFFECTUAR A LOS</u>		<u>A PARTIR DE</u>
20a. lectura	96 hs.	15 seg.	iniciación del bombeo.
21a. "	96 hs.	30 seg.	" " "
22a. "	96 hs.	1 min.	" " "
23a. "	96 hs.	2 " "	" " "
24a. "	96 hs.	4 " "	" " "
25a. "	96 hs.	8 " "	" " "
26a. "	96 hs.	15 " "	" " "
27a. "	96 hs.	30 " "	" " "

y así sucesivamente hasta la lectura 37a., a las 96 hs., 96 hs., = 192 hs, momento en que se da por terminada la prueba.

Simultáneamente se efectuarán lecturas barométricas (o altimétricas) y de temperatura a la sombra, incorporándolas al ritmo adoptado. En el caso de existir estaciones piezométricas, se establecerá un ciclo de lecturas y anotaciones tal como se indicó en la descripción del aforo, con la diferencia de que ahora el caudal será constante y que el proceso respectivo de medición será continuo hasta las cuatro horas. De ahí en adelante se efectuarán ciclos: calculando terminarlos poco antes de las 8, 16, 24, 32, 40, 48 y 96 horas, para luego proceder con el mismo ritmo de lecturas así adoptado a partir del instante en que se suspende el bombeo (96 horas).

OBSERVACIONES FINALES:

No está de más insistir en que todas y cada una de las observaciones se han de registrar junto con la fecha y hora en que fuerón hechas.

a
c
e

chas.

Para el caso de tener pozo de bombeo con uno (o varios), pozos de observación, el ritmo de lecturas está programado suponiendo que hay un observador en cada pozo y que barómetro o altímetro y termómetro están junto a uno de los pozos. Si fuese una sola persona la que tuviera que hacer todas las observaciones, tendría que proceder como se indica a continuación.

Antes de iniciarse la prueba y con cronómetro en mano, el observador hará una lectura en el pozo de bombeo y lecturas de barómetro (o altímetro) y termómetro anotándolas debidamente; se dirigirá al pozo (o pozos) de observación, haciendo la o las lecturas y anotaciones correspondientes y regresará al pozo de bombeo, anotando el tiempo necesario para ejecutar el conjunto de operaciones indicado.

Suponiendo que «por ejemplo» ocupó 5 minutos en el ciclo de observaciones, buscará en la tabla de tiempos en que han de hacerse las observaciones cual es la primera observación que, suprimida, nos deja entre la observación anterior y la siguiente un espacio mayor de 5 minutos; se encuentra que en este ejemplo hay que suprimir la observación a los 4 minutos. Por lo tanto, desde los 15 segundos hasta los 2 minutos «hará observaciones exclusivamente en el pozo de bombeo y una vez hecha esta última, se dirigirá al o los de observación iniciando el primer ciclo completo, anotando, como se indicó, la hora precisa de cada observación.

chas.

Para el caso de tener pozo de bombeo con uno (o varios) pozos de observación, el ritmo de lecturas está programado suponiendo que hay un observador en cada pozo y que barómetro o altímetro y termómetro están junto a uno de los pozos. Si fuese una sola persona la que tuviera que hacer todas las observaciones, tendría que proceder como se indica a continuación.

Antes de iniciarse la prueba y con cronómetro en mano, el observador hará una lectura en el pozo de bombeo y lecturas de barómetro (o altímetro) y termómetro anotándolas debidamente; se dirigirá al pozo (o pozos) de observación, haciendo la o las lecturas y anotaciones correspondientes y regresará al pozo de bombeo, anotando el tiempo necesario para ejecutar el conjunto de operaciones indicado.

Suponiendo que «por ejemplo» ocupó 5 minutos en el ciclo de observaciones, buscará en la tabla de tiempos en que han de hacerse las observaciones cual es la primera observación que, suprimida, nos deja entre la observación anterior y la siguiente un espacio mayor de 5 minutos; se encuentra que en este ejemplo hay que suprimir la observación a los 4 minutos. Por lo tanto, desde los 15 segundos hasta los 2 minutos - hará observaciones exclusivamente en el pozo de bombeo y una vez hecha esta última, se dirigirá al o los de observación iniciando el primer ciclo completo, anotando, como se indicó, la hora precisa de cada observación.

A los 7 minutos habrá terminado el 1er. ciclo, iniciando a los 8 minutos el 2o., a los 5 minutos el 3o., etc.

Siguiendo con el ejemplo; si el tiempo necesario para ejecutar el ciclo hubiera sido -digamos- 7 minutos, en lugar de 5 minutos, la lectura que hay que suprimir es la de 8 minutos, haciendo observaciones exclusivamente en el pozo de bombeo hasta los 4 minutos e iniciando el 1er. ciclo con esta última lectura; el 2o. ciclo a los 15 minutos y así sucesivamente.

En el caso de existir estación (es) piezométrica (s), lo ya indicado cubre los posibles casos que puedan presentarse en la práctica.

Con objeto de que las lecturas sean más precisas, se recomienda que siempre que sea posible se instalen limnigrafos en los pozos de observación, calibrándolos debidamente. Este procedimiento evita la posibilidad de errores en las lecturas, particularmente en los tiempos iniciales de bombeo y recuperación.