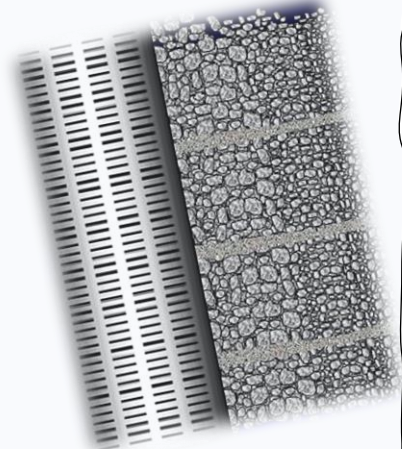




GUÍA PRÁCTICA PARA LA SUPERVISIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA CONSTRUCCIÓN DE POZOS DE AGUA



**LIC. ERNESTO ECHANDI ECHEVERRÍA
HIDROGEÓLOGO**



Agosto de 2022

CONTENIDO

Preámbulo	2
Dedicatoria	3
1. Introducción	4
2. Comprobación de las condiciones del sitio de perforación	5
3. Muestreo e identificación de los materiales perforados	5
4. Protección de tramos superiores del pozo	6
5. Control del aporte de agua subterránea durante la perforación.....	7
6. Control de niveles de agua durante la perforación	8
7. Pérdidas de circulación de fluidos de perforación	9
8. Evaluación hidrogeológica preliminar y diseño de armado final	9
8.1 Valoración preliminar de las condiciones hidrogeológicas identificadas	9
8.2 Diseño final del pozo	10
8.3 Instalación de tubería ciega y rejillas	10
8.4 Establecer el tipo de tapón de fondo de la tubería	12
8.5 Empaque de grava y estabilizador de formación	12
8.6 Sello sanitario, brocal y tubo engravador	13
9. Labores finales en el pozo construido	13
9.1 Limpieza y desarrollo	
10. Prueba de bombeo.....	14
10.1 Planeamiento.....	14
10.2 Equipo de bombeo y acometida eléctrica	14
10.3 Medición de caudales de prueba	14
10.4 Evacuación del agua	14
10.5 Tubo para introducir la sonda al pozo	15
10.6 Ejecución de la prueba de bombeo	15
11. Interpretación de la prueba de bombeo	16
12. Recolección de muestra de agua del pozo	18
13. Informe final de perforación	18
14. Obtención de la viabilidad ambiental de concesión del pozo	18
15. Consideraciones finales	18
Referencias	20
Anexos	21

PREÁMBULO

La perforación de pozos para agua en Costa Rica sigue siendo una alternativa importante para suplir las necesidades de este vital recurso con fines de abastecimiento doméstico, poblacional o particular, también para el desarrollo industrial, de proyectos turísticos y para las actividades agropecuarias.

En este proceso de explotación del recurso hídrico subterráneo, participan tanto las instituciones estatales que brindan los servicios públicos de suministro de agua potable, como las empresas de perforación privadas autorizadas para realizar estos trabajos.

La perforación de pozos está regulada por leyes y reglamentos, con el propósito de asegurar una explotación racional, controlada y justa del recurso hídrico subterráneo, además de evitar posibles conflictos entre los usuarios.

Igual que en cualquier obra civil, es indispensable que cada pozo se construya de la mejor manera para optimizar los recursos invertidos. Paralelamente, es de suma importancia que de cada perforación se obtenga la información más detallada y completa sobre las características hidrogeológicas del subsuelo, que serán de suma utilidad para que las instituciones gubernamentales, que velan por los recursos hídricos, prosigan con su valioso trabajo de investigación y control de éstos.

Como un apoyo para los nuevos colegas que opten por el trabajo dentro del campo de la hidrogeología, he decidido preparar esta guía práctica para la supervisión de pozos, elaborada con las normas técnicas que ofrece la literatura hidrogeológica, pero principalmente con base en las experiencias adquiridas a lo largo de 45 años de trabajar en la prospección hidrogeológica para la construcción de pozos, en la supervisión de las perforaciones, en el diseño de pozos y en pruebas de bombeo.

Mi reconocimiento a muchas personas que me brindaron valiosas experiencias y enseñanzas en este importante campo, entre los que quiero citar a los colegas Ing. Álvaro Suárez Montero, Ing. Mario Fernández Castro, Lic. Jorge Chávez Cernas y Lic. Químico Bernardo Chaves Pittier, Ing. Carlos Font Ulloa; a don Roger Jiménez Rivera y a los técnicos de perforación Jorge Céspedes y Francisco Hernández Bolaños.

También mi agradecimiento a los innumerables clientes que me han brindado la oportunidad y la confianza de ejercer la labor profesional, en esta maravillosa actividad de la prospección de las aguas subterráneas y la perforación de pozos.

Agradezco a los colegas José Francisco Rojas Esquivel, Felipe León Pinzón y a la MSc. Elena Echandi Herrera, por la revisión y aportes a este trabajo.

Dedicatoria

A mis muy apreciados colegas geólogos, que laboran en el fascinante campo de la Hidrogeología y la perforación de pozos.

A todos los técnicos y asistentes de la perforación de pozos con los que he tenido la valiosísima oportunidad de trabajar, por su muy valiosa colaboración y apoyo que me han brindado durante mi permanencia junto a sus máquinas; por sus invaluable aportes en la resolución de los problemas que siempre surgen en esta muy singular y a veces compleja actividad de la construcción de pozos y en especial, por su muy linda y sincera amistad.

1. INTRODUCCIÓN

La supervisión hidrogeológica durante la construcción de los pozos de agua en Costa Rica no solo es obligatoria de acuerdo con los reglamentos actuales, sino que es de vital importancia para que se logren los mejores resultados. Son muchas las labores que le corresponden ejecutar al geólogo responsable de la inspección; la mayoría deben ser realizadas en el mismo sitio de perforación.

La correcta identificación y asociación de la secuencia litológica que se atraviesa durante la construcción de un pozo, además de ser determinante para un adecuado diseño final del pozo, aportará valiosa información sobre la conformación del subsuelo a través de un área determinada.

Durante las labores de perforación el geólogo irá reconociendo las condiciones hidrogeológicas que prevalecen en el subsuelo, lo que le permitirá afinar el modelo conceptual elaborado mediante los estudios previos, respecto a las características del o los acuíferos presentes en el sitio.

Los controles de campo también le permitirán al geólogo, en muchos casos, estimar preliminarmente la capacidad de producción del pozo, lo que será de suma utilidad para el diseño de armado y para determinar el equipo más apropiado para realizar la prueba de bombeo.

El hidrogeólogo programará, ejecutará e interpretará la prueba de bombeo, la cual le permitirá reconocer el comportamiento o eficiencia del pozo así como otras características hidráulicas del acuífero. En esta misma etapa, se recolectarán las muestras del agua subterránea, a fin de efectuar los análisis de calidad bacteriológica y físico química.

Finalmente, el geólogo elaborará el informe final de perforación, en el que se describirá la litología identificada, el armado final del pozo y las características hidrogeológicas reconocidas. De vital importancia será dejar establecido el caudal óptimo de producción del pozo y los períodos de bombeo.

En el mismo informe final de perforación se deben aportar las recomendaciones sobre la protección de la captación y de áreas aledañas al pozo. También es importante señalar los posibles controles periódicos que podrían efectuarse en el pozo, para valorar su comportamiento y el del acuífero captado bajo el nuevo régimen dinámico de producción.

La perforación de pozos mediante el sistema de percusión neumática o rotación con aire comprimido suele ser la que permite un avance más rápido; los métodos de rotación con lodos y de percusión con máquina de cable, pueden ser más lentos en el avance.

El geólogo que supervisará una perforación deberá programar muy bien su rol de trabajo, a fin de asegurar su presencia en el pozo el mayor tiempo posible, o durante los procesos más relevantes del proyecto.

Si por circunstancias determinadas el geólogo debe ausentarse en un momento dado del sitio de perforación, deberá asegurarse, de acuerdo con la prognosis elaborada, de que su ausencia no coincida con una etapa crucial del proceso en que se esperen cambios importantes de litología o entrada a posibles tramos de producción de agua. Para cubrir su ausencia el geólogo deberá de instruir muy bien a los técnicos perforadores, de manera que ellos puedan realizar la más correcta y precisa toma de muestras y control de niveles de agua, y mantener un contacto permanente con ellos.

En el proceso de armado final del pozo es obligatoria la presencia del profesional, no solo para asegurar que éste se realice de acuerdo con el diseño propuesto, sino también para dar fe de la obra que se le entregará al cliente y lo que se reportará en el informe final de perforación. De igual manera, es fundamental su permanencia en el sitio durante la limpieza y desarrollo final del pozo y por supuesto, durante la prueba de bombeo.

En algunas ocasiones, ya sea con fines de investigación o por el tipo de materiales que muestra el subsuelo, se procede a construir primeramente un pozo piloto y luego se efectúa la ampliación final del agujero. En estas circunstancias, el reconocimiento de las litologías, la identificación del o los distintos tramos productores de agua y el control de los niveles de agua, se efectuarán durante la perforación del pozo piloto, y con base en los resultados que se obtengan, se definirán las labores posteriores de construcción.

Durante la ampliación del agujero, la permanencia continua del geólogo en el sitio de perforación podría no ser necesaria, excepto que se requiera corroborar o detallar alguna de la información obtenida mediante el pozo piloto.

2. COMPROBACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL SITIO DE PERFORACIÓN

Lo primero que debe realizar el geólogo al llegar al sitio de trabajo, es comprobar mediante un GPS que el punto donde se construirá el pozo corresponda con las coordenadas que indica el permiso de perforación. Además iniciará el cuaderno de bitácora con la información preliminar pertinente; en el anexo 1 se muestra un posible formato de inicio del cuaderno de bitácora.

El geólogo debe comprobar que el sitio de perforación sea adecuado y seguro para la maquinaria y las personas que trabajarán allí. Además, debe revisar cómo se manejarán y eventualmente evacuarán las aguas y aditivos de perforación.

3. MUESTREO E IDENTIFICACIÓN DE LOS MATERIALES PERFORADOS

Si no existe un estudio hidrogeológico previo para la construcción del pozo, es recomendable que el profesional supervisor investigue por su cuenta la información geológica e hidrogeológica que pueda existir del área donde se realizará la perforación. Con base en lo anterior, podrá elaborar una prognosis de lo que se podría esperar durante la construcción del nuevo pozo.

La identificación de los materiales que se perforan y su posición en la columna litológica atravesada, será fundamental para efectuar el diseño óptimo del armado del pozo; pero además, le permitirá al geólogo empezar a reconocer e interpretar las características hidrogeológicas que allí se presentan.

Es importante considerar que cada metro de perforación tiene un costo relativamente elevado, así que la información que obtiene y aporta el geólogo, derivada de cada pozo, es sumamente valiosa para el país, en especial para el respetado gremio geológico en sus trabajos de prospección de aguas o para diferentes estudios científicos.

El geólogo deberá llevar un control de avance de la profundidad desde el inicio, e indicarle al perforador en qué intervalos se recolectarán las muestras. Se recomienda obtener dos muestras de los recortes de perforación para cada tramo previamente definido por el geólogo.

Una muestra se lavará y de ésta, una parte se procederá a secar. El secado puede realizarse por cualquier método de que se disponga; puede ser mediante un soplete manual de gas, velas si fuera el caso, o hasta colocándola sobre una parte de la maquinaria de perforación que esté caliente. Se analizará la muestra seca y la húmeda para llegar a una adecuada identificación.

Durante este proceso, el geólogo puede revisar las descripciones litológicas que puedan aportar los estudios geológicos del área donde se localiza el pozo; esto podría facilitarle la interpretación de los recortes obtenidos.

Si en algún tramo de la perforación se presentan dudas sobre el tipo de roca de las muestras obtenidas, es conveniente efectuar una descripción muy detallada de su composición, como el tipo de granos o fragmentos observados, tipo y conformación de la matriz, dureza, grado de consolidación, etc. Esto podría facilitarle a otro colega la posible interpretación de la roca perforada.

La otra muestra obtenida sin lavar servirá para determinar el posible contenido de sedimentos finos como limo o arcilla. Se debe intentar reconocer qué porcentaje del limo o arcilla que trae la muestra forma parte de la unidad perforada, y qué porcentaje podría corresponder al lodo de perforación utilizado o a materiales que fueron perforados más arriba y permanecen dentro del fluido de perforación.

Si en determinado momento se notara que las muestras obtenidas pudieran estar muy “contaminadas”, por los recortes de distintas unidades superiores atravesadas, se le solicitará al operador de la máquina que detenga el avance y que se hagan circular los fluidos para limpiarlos; esto aplica para cualquier método de perforación, con rotación y lodos, aire o percusión con cable.

En algunos casos, en presencia de acuíferos arenosos, se requerirán muestras para efectuarles análisis granulométricos.

El geólogo aportará una valoración sobre las permeabilidades aparentes de cada unidad identificada, se encuentren saturadas o no.

Durante esta etapa, es igualmente importante observar de manera continua el tiempo de avance de la perforación y el comportamiento en general de la maquinaria, por ejemplo vibraciones, el sonido que se produce, el torque, etc. Estos aspectos pueden ser muy relevantes y precisos, en cuanto a identificar el momento en que ocurren cambios en las litologías perforadas. Cuando se note alguna variación de este tipo, puede ser importante detener de inmediato el avance de penetración y, proceder a circular o inyectar fluidos para extraer los recortes acumulados; luego de unos minutos, se procederá a perforar de nuevo y a tomar las muestras, las cuales probablemente sean más representativas de la nueva unidad penetrada.

Muchas veces dentro de una columna litológica perforada, la presencia de una capa determinada de roca de muy pequeño espesor puede tener especial relevancia en la correcta identificación hidrogeológica del pozo. Por ejemplo, dentro de las secuencias de rocas volcánicas como las del Valle Central o Guanacaste, suelen ser muy comunes la presencia de paleosuelos arcillosos quemados de muy poco espesor y muy baja permeabilidad. El reconocimiento de estos paleosuelos dentro de la columna perforada permite identificar diferentes coladas de lavas o depósitos de piroclastos, y ligados a éstos, distintos tramos acuíferos y sus posibles condiciones de confinamiento o no.



Figura 1: Contacto quemado entre unidades volcánicas

4. PROTECCIÓN DE TRAMOS SUPERIORES DEL POZO

La instalación de una tubería de revestimiento (TR) en un tramo superior del pozo puede obedecer a tres factores:

- a. Protección sanitaria por posibles elementos contaminantes que puedan presentarse en la superficie cerca del pozo, para evitar que las mismas puedan infiltrarse a través del suelo y alcanzar de manera directa el agujero de la perforación.
- b. Para aislar algún tramo acuífero colgado que no se quiera captar mediante el pozo
- c. Para asegurar o estabilizar alguna unidad geológica inestable que se presente en la parte superior.

Las tuberías de revestimiento utilizadas para proteger algún tramo del pozo generalmente son metálicas, y los espesores más comunes empleados son de 3/16" (4,76 mm) a 1/4" (6,3 mm). No se recomiendan espesores inferiores a 4,76 mm, como las de 1/8" (3 mm) pues dicha tubería podría colapsar.

Es recomendable que la TR quede bien ajustada al agujero, para prevenir una posible erosión o desprendimientos de las paredes recubiertas, y que dichos materiales desciendan por debajo de dicha tubería de protección. Con este propósito también puede ser posible llevar la TR hasta el fondo del agujero ampliado, y luego forzarla a bajar a presión lo que se pueda o se considere necesario, a través del diámetro de perforación inicial; de esta manera quedaría un tramo de tubería "enterrado" en la formación subyacente. En otros casos es posible inyectar una lechada de cemento en el espacio anular entre la formación inestable y la TR.

5. CONTROL DEL APORTE DE AGUA SUBTERRÁNEA DURANTE LA PERFORACIÓN

Otro de los controles importantes que debe ejercerse, es el de identificar y valorar los posibles aportes de agua subterránea durante el proceso de perforación. La ocurrencia del aporte de agua hacia el pozo es más fácil de reconocer y valorar cuando se está perforando con aire comprimido, que cuando se están empleando lodos.

La perforación con aire comprimido puede originar que cuando la herramienta alcance el techo de un acuífero, se evidencie la afluencia de agua a la superficie. Si el caudal que produce el tramo acuífero penetrado es muy bajo, puede ser posible que no se observe un aporte significativo del agua expulsada, pero podría evidenciarse una dilución importante del espumante que se está aplicando.



Figura 2: Perforación con aire comprimido y espumante



Figura 3: Perforando con circulación de lodos

Cuando la perforación se realiza empleando lodos, puede resultar más difícil identificar la ocurrencia del agua subterránea. Dependerá de las características del lodo que se esté utilizando y del potencial de producción del acuífero penetrado, que la presencia del agua subterránea pueda ser identificada plenamente mediante este tipo de perforación. Una evidencia del aporte de agua desde un acuífero en estas circunstancias sería la dilución del lodo de perforación.

También, mediante este método de perforar, es posible evidenciar el aporte de agua subterránea mediante el control de los niveles que muestran las pilas de lodo. Por lo general y en condiciones normales de perforación, las pilas de lodos tienden a mostrar descensos leves por pérdidas en la formación o en superficie. Si en determinado momento se observara que este vaciado cesa o que incluso, sube el nivel de agua en las pilas, se podría considerar que está ocurriendo un aporte de agua subterránea.

6. CONTROL DE NIVELES DE AGUA DURANTE LA PERFORACIÓN

Durante todo el proceso de perforación es preciso llevar un control de los niveles de agua en el pozo. De ser posible, se realizarán medidas al finalizar los trabajos de perforación del día y antes de iniciar la perforación al día siguiente.

Cuando se trabaja con lodos, es necesario valorar si los niveles de agua medidos durante el proceso de perforación realmente corresponden a un nivel freático o piezométrico, o si los lodos están controlando la afluencia del agua subterránea hacia el agujero, manteniendo plenamente saturado el agujero.

7. PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN DE FLUÍDOS DE PERFORACIÓN

La pérdida de circulación de cualquiera tipo de fluido durante la construcción del pozo, puede generar una serie de problemas técnicos para el avance de la perforación como para el proceso del control hidrogeológico del pozo.

Por lo general, cuando se perfora mediante el empleo de lodos, la pérdida de circulación debe ser remediada para poder proseguir el avance.

Cuando se perfora mediante el método de inyección de aire comprimido, la presencia de una roca muy permeable, sin saturación de agua subterránea, puede ocasionar la pérdida del fluido espumante. Esta situación puede darse antes de alcanzar un acuífero o por debajo de un acuífero colgado, si su potencial de producción no es muy alto. En estas condiciones y dependiendo de diversas características de las unidades geológicas involucradas, podría ser posible seguir avanzando con la perforación. Por ejemplo, si aún con la pérdida del fluido se logra alcanzar un acuífero de muy alto potencial, puede ser posible que se recupere el retorno del espumante; en otros casos, eso no es posible. En estas circunstancias podría detenerse la perforación en un momento dado, y proceder a introducir una sonda de medición para comprobar si existe un nivel de agua en el pozo.

Si se decide proseguir perforando mediante la inyección de aire en condición de pérdidas de retorno de fluido se deberá tener extrema precaución. Esto por cuanto podría ser posible que los recortes de las rocas perforadas se estén acumulando dentro de la unidad litológica permeable que no se encuentra saturada de agua, y que en el momento en que se detiene la inyección de aire y fluido, esos recortes puedan devolverse e ingresar al agujero, atrapando la herramienta de perforación.

En muchas ocasiones, es preciso remediar la pérdida de fluidos para poder continuar con la perforación. Para resolver este tipo de problemas se emplean distintos métodos, entre ellos la instalación de tubería de revestimiento, si las pérdidas no se originan a mucha profundidad, también la dosificación de los lodos de perforación o el empleo de aditivos. En casos muy críticos podría ser necesario realizar cementaciones y reperforar después.

8. EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA PRELIMINAR Y DISEÑO DE ARMADO FINAL

8.1. Valoración preliminar de las condiciones hidrogeológicas identificadas

Al finalizar las labores de perforación, el geólogo deberá tener bien identificadas las características hidrogeológicas que prevalecen en el subsuelo y que pueden ser las siguientes:

- Presencia de un único acuífero en la columna perforada.
- Presencia de acuíferos colgados antes del reservorio principal
- Presencia de un acuífero multicapa
- Caracterización de la unidad litológica que da origen al acuífero.
- Reconocer si el acuífero es de tipo poroso o fisural.
- Localización precisa de techo y base del acuífero, espesores aproximados de los tramos productores.
- Establecer si el acuífero es libre, semi confinado o confinado.
- Valorar una producción aproximada del acuífero.
- Establecer la posición del nivel estático

8.2 Diseño final del pozo

Se espera que el adecuado diseño de armado permita obtener una buena eficiencia del pozo, reflejada en una eficiente entrada del agua subterránea a través de las rejillas, que asegure las menores pérdidas de carga durante el bombeo.

En términos generales, el diámetro de perforación final de un pozo y los diámetros de la tubería y rejilla a instalar, dependerán del caudal de agua que se pretende extraer y en función del diámetro estimado del equipo de bombeo a colocar dentro del pozo.

El tipo, longitud y abertura de la rejilla a instalar, así como el posible empaque de grava del pozo, se determina con base en características del acuífero tales como, la textura de la formación geológica, el espesor del o los tramos productores de agua y en la producción esperada para el proyecto.

Es importante considerar las resistencias de las tuberías y rejillas, en función de la profundidad alcanzada y del tipo de unidades geológicas que se atravesarán.

En pozos de baja a mediana producción de agua subterránea es posible, en la mayoría de los casos simplificar la metodología del diseño constructivo, pero cumpliendo con especificaciones de seguridad y calidad. Esta metodología simplificada del diseño constructivo de pozos ha sido aplicada y valorada en una enorme cantidad de pozos perforados a través de todo el territorio de Costa Rica.

Por ejemplo, para caudales de menos de 15 litros por segundo, 6 metros de rejilla con un área de admisión mínima del 12% que puede obtenerse de un slot 40, resulta suficiente para mantener una velocidad de entrada menor a 3 cm/s. Esta condición es muy importante para mantener un flujo laminar desde el acuífero y hacia el interior del pozo, originando leves pérdidas de carga y bajo riesgo de entrada de sedimentos finos.

Para pozos de alta producción será necesario efectuar un análisis detallado sobre la longitud y el tipo de rejilla que se deberá de instalar, principalmente en función del espesor del acuífero. Con ese propósito se deben de efectuar los cálculos que correspondan, empleando las tablas con las especificaciones técnicas de las rejillas que se vayan a emplear.

Para este tipo de pozos es recomendable instalar filtros de grava con espesores mínimos de 2,5" (6 cm). Debido a que en nuestro medio resulta complicado disponer de gravas con selecciones texturales precisas, se ha utilizado con muy buenos resultados, empaques con clastos redondeados con diámetros de entre 5 y 15 mm de diámetro.

a. Instalación de tubería ciega y rejillas

Asumiendo que ya existía un diseño preliminar del pozo a construirse, que establecía los diámetros de perforación, los diámetros y tipos de tubería ciega y rejilla y las longitudes aproximadas de estas, lo que corresponde con el agujero final ya perforado es lo siguiente:

- i. Comprobar la verticalidad del agujero: Antes de introducir la tubería al pozo, es necesario asegurar una correcta verticalidad para que la misma quede bien centrada en el agujero. En algunos casos se requiere de centradores para la tubería, que pueden ser originales de fábrica o elaborarse, de acuerdo con el criterio de los operadores y del geólogo.
- ii. Instalar tubería de revestimiento o protección en los casos en que sea necesario.

iii. Determinar la longitud final de las rejillas y los tramos en los que se enfrentará al acuífero.

Con base en la información obtenida durante la perforación del agujero, el geólogo procederá a elaborar el diseño de armado final del pozo. En este proceso, una de las tareas más importante será sin lugar a duda, ubicar de la manera más precisa los tramos de rejillas de captación del agua a través de la columna perforada.

Debe recordarse que en un pozo equipado con filtro de grava, el desplazamiento de las rejillas, hacia arriba o por abajo de los tramos acuíferos, podría reducir notablemente la eficiencia de la producción del pozo. Esta situación es mucho más crítica cuando se trata de acuíferos fisurales, en los que el aporte de agua subterránea se puede ver limitado a tramos muy pequeños de la columna geológica perforada.

Si por determinadas circunstancias, principalmente en acuíferos de limitado espesor, no existiera una certeza sobre la localización de los tramos productores, será conveniente realizar un registro eléctrico dentro del pozo.

Hasta donde sea posible y si las condiciones del o los acuíferos lo permiten, es conveniente instalar una cámara de bombeo en medio de los tramos productores del agua subterránea.

Al geólogo le corresponderá inspeccionar y medir las tuberías y rejillas disponibles y anotar en la bitácora el diseño de armado. Cuando se vayan a emplear rejillas tipo persiana horizontal metálicas, es conveniente revisarlas muy bien antes de instalarlas, pues algunas de estas rejillas industriales pueden presentar aberturas defectuosas o estar bloqueadas por el revestimiento o pintura que se les aplica.

Por lo general las tuberías y rejillas se fabrican en tramos de 3 o 6 metros, no obstante, los tubos que corresponden con las rejillas muestran pequeños tramos ciegos al inicio y final, que deben ser considerados a la hora del diseño. Esto es fundamentalmente importante en presencia de acuíferos de pequeño espesor o en acuíferos multicapa o estratificados. Igualmente, si el pozo es muy profundo, es importante considerar la longitud de los tramos de tubería que entran en la campana.

Algunos tipos de rejillas para pozos:



Figura 4: *Persiana horizontal*



Figura 5: *Ranura continua PVC*



Figura 6: *Ranura continua en acero*

b. Establecer el tipo de tapón de fondo de la tubería

El tipo de tapón de fondo dependerá de si la tubería es metálica o de PVC; en ambos casos puede ser necesario hacer agujeros muy finos en el tapón para facilitar el descenso de la tubería debido a la presión de los lodos que producen un efecto de flotación.

En algunas condiciones especiales, puede resultar prudente hacer descender la tubería con el fondo abierto, previendo el caso de que pudieran presentarse pequeños desprendimientos de materiales que pudieran impedir que la tubería siga bajando. También pueden formarse obstrucciones por la acumulación de lodos muy densos, que se desprendieron del cake. En estos casos, es posible introducir una broca por dentro de la tubería para desbloquear el tramo y permitir el descenso de nuevo.

Una vez que la tubería haya descendido hasta el fondo es posible instalar un tapón, ya sea introduciendo un cilindro pesado construido con algún material inerte que no afecte la calidad de agua del pozo. Otra opción, es la de introducir dentro de la tubería, con mucho cuidado y muy despacio, piedras redondeadas pesadas que formen un tapón en la parte inferior del pozo, de al menos 40 a 50 centímetros de altura.

8.5 Empaque de grava y estabilizador de formación

El empaque de grava tiene la función de controlar la entrada de materiales finos al pozo a través de las rejillas. El espesor y granulometría del filtro, lo definirá el geólogo de acuerdo con las valoraciones que realice de los materiales identificados en la perforación y del slot de las rejillas.

El estabilizador de formación suele emplearse en pozos que muestran unidades geológicas consolidadas, pero que podrían tener desprendimientos que bloqueen el espacio anular o dañen las tuberías del pozo. Los materiales que se emplean como estabilizador de formación, pueden mostrar mayores diámetros que un filtro de grava y generar mayores porosidades en el espacio anular.

El geólogo debe velar por que la instalación del empaque de grava o estabilizador se realice con sumo cuidado, a fin de asegurar que los materiales descendan libremente a través del espacio anular hasta el fondo y que no se produzcan puentes que interfieran con el llenado completo de ese espacio.



Figura 7: Filtro de grava en pozo para agua

Si se está trabajando con lodos, es preciso eliminar el mayor contenido posible de arenas antes de introducir la grava y luego, bajar su viscosidad a un máximo de 30 segundos, mediante el embudo Marsh.

Antes de proceder a la instalación del empaque de grava, debe de realizarse una estimación aproximada del volumen de materiales que debe de acomodarse en el espacio anular, aplicando la fórmula:

$$V = \pi/4 * h * (D^2 - d^2)$$

V: Volumen del espacio anular entre la formación geológica y la tubería del pozo

h: Longitud del pozo

D: Diámetro del agujero

d: Diámetro externo de la tubería

De ser posible, se recomienda ir controlando el descenso del filtro de grava mediante un cable con contrapeso.

El fondo de las tuberías que se instalan dentro del pozo puede llevar un tapón de fondo o no, dependiendo de las condiciones geológicas halladas y del tipo de pozo. En los pozos con empaque de grava, es necesario sellar el fondo para evitar una eventual entrada de grava a la tubería.

8.6 Sello sanitario, brocal y tubo engravador:

El sello sanitario y brocal del pozo son dos estructuras muy importantes para prevenir el riesgo de contaminación del pozo. La longitud del sello sanitario dependerá del tipo de material superficial que se presente en el sitio; a mayor permeabilidad deberá extenderse a más profundidad dicho sello.

Es preciso instalar un tramo de tubería, de al menos 3 pulgadas de diámetro, que se extiende desde la base del sello sanitario y sobresalga sobre el brocal, que servirá como alimentador de grava, en el caso de que descienda el filtro instalado.

9. LABORES FINALES EN EL POZO CONSTRUIDO

9.1 Limpieza y desarrollo

Los métodos y tiempos de duración de las actividades de limpieza y desarrollo de los pozos, pueden variar mucho en función de las características de cada uno. Es muy lógico que los pozos construidos con la utilización de lodos, se requieren más detalles y cuidados a la hora de programar y realizar estas actividades.

Existen varios métodos para la limpieza y desarrollo de los pozos, siendo muy común y recomendable, aplicar varios de estos simultáneamente. Los más comunes son:

- Introducción de agua limpia por bombeo hacia el pozo. Es muy recomendable efectuar este proceso antes de proceder a aplicar otros métodos de limpieza.
- Por medio de inyección de agua con aire comprimido.
- Aplicando pistoneo.
- En casos especiales, empleando determinados aditivos.

Los pozos construidos con aire comprimido y espumantes pueden ser más sencillos de limpiar y desarrollar, sin embargo, si el fluido espumante ha invadido muy profundamente y en gran medida algunos tramos muy permeables en la columna, puede llevar tiempos más prolongados.

10. PRUEBA DE BOMBEO

10.1 Planeamiento

- Tipo de prueba: A caudal constante o por etapas.
- Tiempo de bombeo.
- Caudal al que será probado el pozo: El caudal puede escogerse basado en los requerimientos del propietario, o con base en el caudal máximo estimado que pueda ceder el pozo.

10.2 Equipo de bombeo y acometida eléctrica

El equipo de bombeo se escogerá de acuerdo con el caudal estimado de prueba y a la posible carga dinámica esperada durante el ensayo. Debe determinarse si existe disponibilidad de corriente eléctrica cercana para el equipo de bombeo o si se requerirá de una planta eléctrica.

10.3 Medición de caudales de prueba

Para calibrar y controlar los caudales del ensayo de bombeo, puede emplearse un hidrómetro en la tubería de descarga o realizar mediciones volumétricas con balde o estañón. Entre más grande sea el volumen del recipiente de medición, más precisa será la medida del caudal.

Otro método de medición de caudales emplea una tubería de descarga horizontal fuera del pozo con reducción al final y tubo piezométrico para medir alturas.

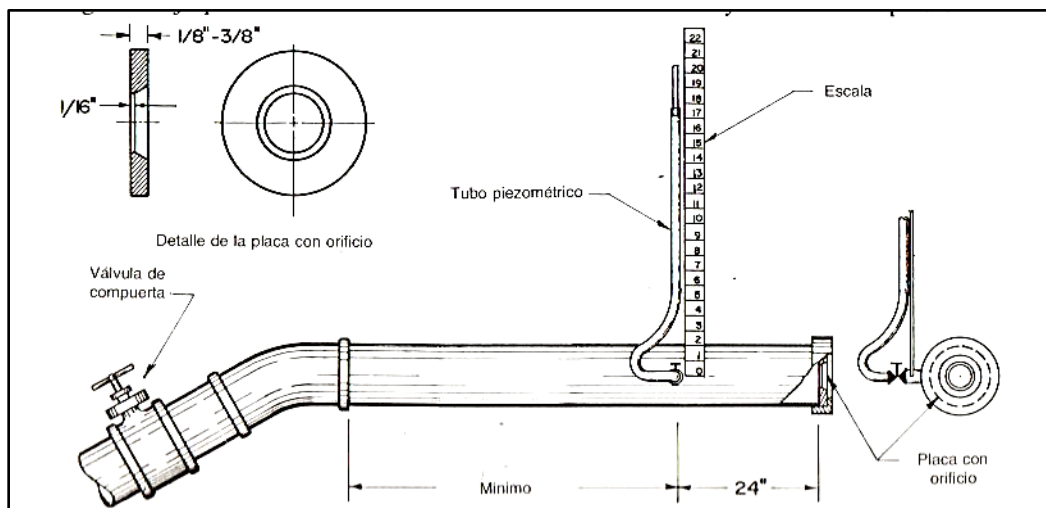


Figura 8: Sistema de medición de caudales mediante tubería de descarga, diafragma y tubo piezométrico

Para obtener los caudales de producción se emplea una tabla donde se relacionan los diámetros de la tubería de descarga y de la reducción con el nivel piezométrico medido (cuadro 1, anexos).

10.4 Evacuación del agua

Es muy necesario planear y acondicionar una adecuada evacuación del agua extraída durante la prueba, a una suficiente distancia, la que debe ser estimada de acuerdo con el tipo de acuífero captado.

En los acuíferos más superficiales, por ejemplo de tipo aluvional, se recomienda una evacuación del agua más efectiva, mediante el uso de tuberías y a una suficiente distancia del pozo; de esta manera se asegurará que no se originen retornos al acuífero captado dentro del radio de influencia más cercano.

Los cauces naturales cercanos pueden ser empleados con este fin, siempre y cuando se establezca que no se dé una infiltración efectiva hacia el acuífero captado.

10.5 Tubo para introducir la sonda al pozo

Para realizar la prueba, es necesario instalar una tubería PVC con un diámetro mínimo de $\frac{3}{4}$ de pulgada, la cual será empleada para introducir la sonda de medición de niveles. Esto con el propósito de que la cinta de la sonda no se enrede en los cables eléctricos de la bomba o en la tubería de succión, y para que el indicador de niveles no se vea afectado por posibles caídas de agua colgadas o humedad dentro del pozo.

10.6 Ejecución de la prueba de bombeo

Se recomienda realizar un ensayo preliminar de bombeo antes de iniciar la prueba formal. Esto permitirá calibrar mediante la llave de paso instalada en la tubería de descarga, el caudal o caudales a los que se ha programado la prueba; además se podrá medir la tendencia de los niveles dinámicos a fin de comprobar si los abatimientos observados se ajustarán para el período de bombeo programado.

Suele ser común de que en algunos ensayos realizados sin la supervisión adecuada, se inicie el bombeo a un caudal superior a la capacidad de producción del pozo. Bajo esta circunstancia, los niveles dinámicos descienden muy rápidamente y pueden ocurrir dos cosas: 1) A medida que descienden los niveles, también disminuye el caudal de extracción de la bomba, por el aumento de la carga dinámica; en algún momento puede ser posible que el pozo tienda a estabilizarse a un caudal determinado o, que sigan descendiendo los niveles y caudales. 2) Que el nivel dinámico descienda rápidamente hasta alcanzar el intervalo de succión de la bomba; a partir de ese momento se entra a un bombeo a caudal crítico, en el cual la bomba extraerá el caudal real de producción del pozo.

Después de realizado el ensayo preliminar que determine el caudal sostenible de bombeo, se dará un tiempo prudencial antes de iniciar la prueba definitiva; esto de acuerdo con la capacidad de recuperación del pozo.

Es importante, hasta donde sea posible, que durante el transcurso de la prueba el geólogo lleve un control gráfico e interpretación preliminar de los resultados de la prueba, ya sea mediante equipo portátil de cómputo o en papel semilogarítmico. Esta práctica le podría ser muy útil para tener un criterio del comportamiento del pozo y acuífero durante el transcurso del ensayo y eventualmente, efectuar alguna modificación de las condiciones del bombeo que se había programado inicialmente que podría ser, una variación del caudal de prueba o un cambio en el tiempo final de bombeo.

Medidas de recuperación de niveles

Una vez que cesa el bombeo se procederá a la medir los niveles de recuperación del pozo. El tiempo de medición de la recuperación será muy variable en cada caso, pues dependerá del comportamiento del acuífero captado o por otras características hidrogeológicas propias del pozo. Se señala como norma, que el tiempo de recuperación sea al menos de un diez por ciento del tiempo de bombeo, siempre y cuando no se alcance la recuperación total en un menor tiempo.

11. INTERPRETACIÓN DE LA PRUEBA DE BOMBEO

Para la más completa y real interpretación de los resultados de una prueba de bombeo, resultan muy valiosas las siguientes consideraciones:

- Haber reconocido durante la perforación las características hidrogeológicas del pozo construido.
- Considerar el diseño de armado final del pozo
- Obtener y analizar la información básica hidrográfica, geológica e hidrogeológica regional.

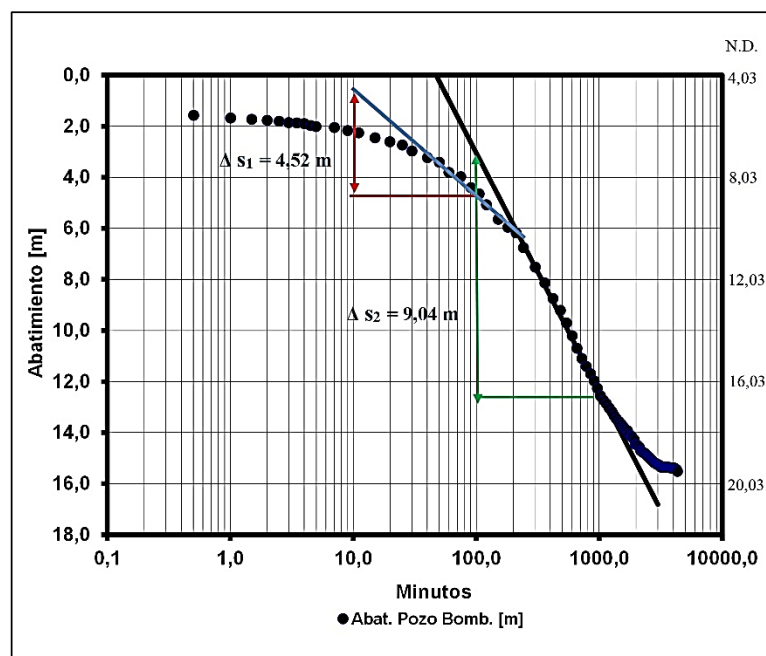
Los datos derivados de la prueba pueden graficarse manualmente en papeles logarítmicos o semi logarítmicos, o por medio de programas matemáticos.

Para realizar una adecuada y detallada interpretación de la prueba de bombeo, resulta fundamental considerar la información que pudo obtenerse durante el proceso de construcción del pozo, con relación a las litologías observadas, los aportes de agua identificados durante la perforación, el comportamiento de los niveles de agua y las características geológicas del área donde se ubica dicho pozo.

Por lo tanto, no se trata solamente de aportar un valor de transmisividad y de coeficiente de almacenamiento al informe final, obtenido muchas veces mediante el trazado de una sola línea de mejor ajuste de todos los puntos del gráfico, cuando en realidad pueden estarse presentando distintas rectas, originadas por anomalías relacionados con las características que muestra el pozo en sí, o con la morfología del acuífero en las inmediaciones del área del proyecto.

Con este propósito puede resultar muy útil incorporar junto a los valores de abatimientos en el eje de ordenadas del gráfico, los valores que corresponden al nivel dinámico a la misma escala. De esta manera, se podrá visualizar la evolución del nivel dinámico respecto a las distintas unidades litológicas identificadas en la columna y a las distintas condiciones hidrogeológicas que ellas muestran. También reconocer el comportamiento del nivel dinámico con relación al diseño de armado del pozo.

Figura 9:



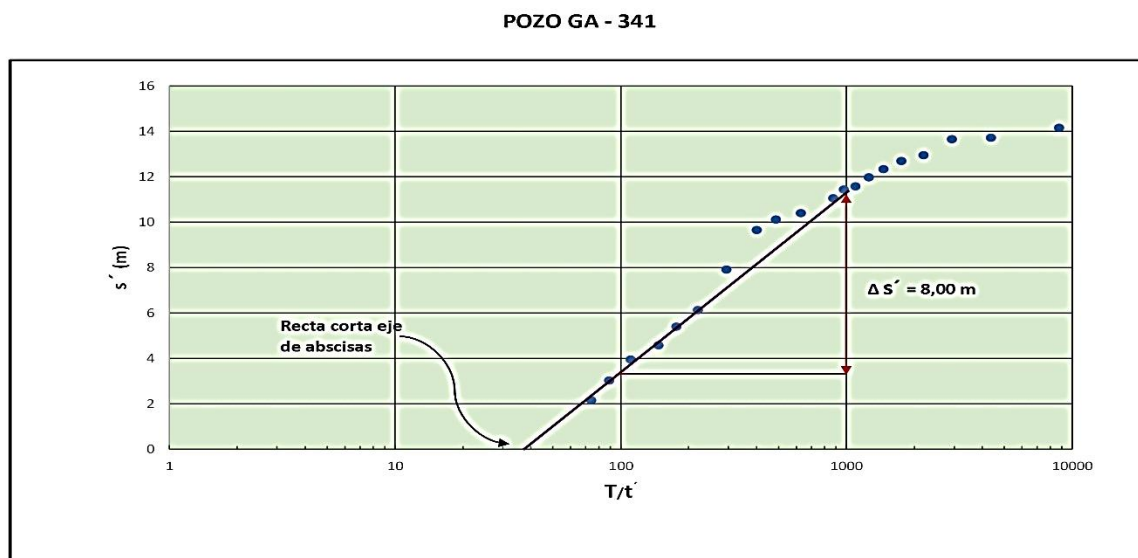
La identificación del coeficiente de almacenamiento de un acuífero, fundamentalmente se puede lograr cuando se cuenta con un pozo testigo cercano al pozo de bombeo. No obstante, la condición de acuífero libre, semi confinado o confinado, sin un valor de S específico, puede establecerse mediante el adecuado control hidrogeológico durante las labores de construcción del pozo, valorando las distintas unidades geológicas atravesadas, sus características de permeabilidad aparente, los aportes de agua durante la perforación y el comportamiento de los niveles de agua.

En algunos casos es posible obtener, mediante el programa de “Interpretación de Pruebas de Bombeo en Pozos de Gran Diámetro” de Gunther Schosinsky Neverman (2002), un valor muy aproximado del coeficiente de almacenamiento en pozos profundos perforados. Esta valoración puede realizarse fundamentalmente cuando el pozo se encuentra captando un solo tramo acuífero, y en el cual no se presenta un abatimiento muy fuerte al inicio del bombeo debido a pérdidas de carga.

Dependiendo de las condiciones del pozo, puede ser posible que reduciendo el caudal de prueba se generen menores pérdidas de carga al inicio de la prueba, permitiendo una resolución del valor del coeficiente de almacenamiento mediante el programa de Schosinsky.

En el libro Hidráulica de Pozos de Lohman, se presenta un método para el cálculo aproximado del coeficiente de almacenamiento, aplicando una relación empírica con el espesor del acuífero.

En algunos casos, las resoluciones de los parámetros hidráulicos del acuífero pueden obtenerse con mayor precisión mediante los análisis de los gráficos de recuperación. Es recomendable elaborar, además del gráfico de recuperación calculada, el gráfico de recuperación residual, el cual permite reconocer si durante el bombeo se originó un proceso de vaciado del acuífero, o si se evidencia una recarga externa al sistema pozo-acuífero.



Fecha: 30 de julio de 2021
 Nivel estático: 4,03 metros
 Caudal de bombeo: 4,00 litros/seg = 345,60 m³/d
 $\Delta s'$: 8,00 metros
 $T = 7,90 \text{ m}^2/\text{d}$

Figura 10: Gráfico de recuperación residual

12. RECOLECCIÓN DE MUESTRA DE AGUA DEL POZO

El Reglamento para la Perforación de Pozos y Aprovechamiento de Aguas Subterráneas (MINAE, 2021) exige efectuar y aportar análisis de la calidad físico química y bacteriológica del agua del pozo construido.

En la mayoría de los casos, las muestras del agua se obtienen antes de finalizar la prueba de bombeo.

En este sentido, es importante aclarar que tanto durante las labores de construcción del pozo, así como en la instalación del equipo de bombeo, con cables y tubería de succión, el agua del pozo muy posiblemente estará contaminada por bacterias. Por lo tanto, es común que las muestras de agua tomadas al final del bombeo muestren en distintos grados, la presencia de coliformes.

Por esta razón, una vez que se instale el equipo de bombeo definitivo con el que operará el pozo, se debe realizar una adecuada desinfección para luego recolectar una nueva muestra de agua para el análisis bacteriológico. Existen normativas en cuanto a los tiempos en que las muestras de agua deben ser entregadas al laboratorio, después de haber sido recolectadas del pozo.

13. INFORME FINAL DE PERFORACIÓN

El informe final de perforación se elaborará con el formato que establece la Dirección de Agua del MINAE, pero además y a criterio del geólogo, pueden añadirse otras hojas en las que se detallen los aspectos hidrogeológicos más relevantes identificados, además de presentar mayores detalles sobre los resultados de la prueba de bombeo y la interpretación de los resultados de los análisis de agua.

También en esos anexos, se podrán efectuar las recomendaciones sobre el régimen de explotación más apropiado y eventuales controles periódicos del comportamiento del pozo y del acuífero captado.

14. OBTENCIÓN DE LA VIABILIDAD AMBIENTAL DE CONCESIÓN DEL POZO

El geólogo que supervisó la construcción del pozo será sin duda el profesional más idóneo para realizar el trámite de la viabilidad ambiental del pozo ante la SETENA.

15. CONSIDERACIONES FINALES

“Un acuífero no existe mientras no se le descubra”

Existen varias maneras en que un acuífero puede ser identificado, entre ellas la presencia de manantiales, el flujo base que mantienen algunas corrientes de agua superficiales o lagos en los períodos de estiaje y por medio de la construcción de pozos.

Antes del siglo XX, la mayor disponibilidad de agua para las poblaciones se obtenía de fuentes superficiales o en menor proporción de manantiales. Debido al notable incremento de la población mundial y al desarrollo acelerado de nuevas actividades productivas, sumado a que las fuentes superficiales no estaban cerca de las áreas en donde se requería el agua, a inicios del siglo XX se dio un enorme auge en la construcción de pozos profundos.

En pocos años, el recurso hídrico subterráneo se convirtió en muchas regiones del mundo, en la fuente primordial de abastecimiento para uso poblacional, industrial, turístico y en actividades agropecuarias. Al respecto, el muy reconocido Hidrogeólogo Dr. Emilio Custodio señaló algo muy interesante e impactante en el último Congreso Geológico realizado en Panamá: *“El mayor descubrimiento del Siglo XX fue el agua subterránea”*.

Una de las actividades más fascinantes y de gran importancia en el campo de la hidrogeología, es la construcción de pozos para el aprovechamiento del agua subterránea. A diferencia de otras muchas obras civiles que se construyen sobre la superficie, cada pozo que se perfora aporta nuevos detalles muy valiosos sobre la litología del subsuelo, que puede ser empleada con muchos fines prácticos y de investigación; pero más importante aún, es la información hidrogeológica obtenida y que puede ser aplicada para reconocer con mucho más detalle, las características que presentan los acuíferos en cada región y aplicarlo al manejo integrado de las cuencas hidrogeológicas.

REFERENCIAS

Dirección de Agua; 2021: Reglamento para la Perforación de Pozos y Aprovechamiento de Aguas Subterráneas. Decreto N° 43053-MINAE

Lohman, S.W.; 1977: Hidráulica Subterránea. Editorial Ariel, Barcelona.

Schosinsky N, G; 2002: Interpretación de Pruebas de Bombeo en Pozos de Gran Diámetro. Revista Geológica de América Central No. 27. UCR

BIBLIOGRAFÍAS RECOMENDAS

Brassington, R.; 1988: Field Hydrogeology. Geological Society of London.

Driscoll, F G.; 1989: Groundwater and Wells. . Johnson Filtration System Inc. Second Edition.

Roscoe Moss Company; 1985: The Engineers' Manual For Water Well Design.

Roscoe Moss Company; 1990: Handbook of Ground Water Development. Wiley-Interscience Publication.

Williams, D; 1985: Modern Techniques in Well Design. Reprint an copyrighted as part of Journal American Water Works Association. Vol. 77, No.9

ANEXOS

Formato de inicio de la Bitácora de Actividades Geológicas para pozos

Cuadro 1: Caudales estimados mediante un vertedero de orificio circular

BITÁCORA ACTIVIDADES GEOLÓGICAS

- Fecha:
- Pozo No. _____
- Expediente Dirección de Agua:
- Número de Oficio del permiso de perforación:
- Propietario del pozo:
- Empresa perforadora:
- Geólogo que supervisa:
- Ubicación del pozo: Provincia, cantón, distrito, localidad
- Coordenadas del pozo:
- Uso del agua:
- Técnico (s) de perforación:
- Equipo de perforación:
- Método de perforación:
- Objetivo hidrogeológico del pozo:
- Operaciones de perforación:
 - Diámetro inicial de perforación:
 - Tipo de broca
 - Aditivos empleados
 - Litología:

Head of water in	4-in Pipe		6-in Pipe		8-in Pipe			10-in Pipe			12-in Pipe		16-in Pipe		
	2½-in orifice gpm	3-in orifice gpm	3-in orifice gpm	4-in orifice gpm	4-in orifice gpm	5-in orifice gpm	6-in orifice gpm	6-in orifice gpm	7-in orifice gpm	8-in orifice gpm	6-in orifice gpm	8-in orifice gpm	8-in orifice gpm	10-in orifice gpm	12-in orifice gpm
5	55	89	76	145	131	220	355	310	460	680	300	580	530	880	1,420
6	60	97	82	158	144	240	390	340	500	740	325	640	580	960	1,560
7	65	105	88	171	156	260	420	370	540	830	350	690	620	1,040	1,680
8	69	112	94	182	166	275	450	395	580	880	375	730	670	1,110	1,800
9	73	119	100	193	176	295	475	420	610	940	400	780	710	1,180	1,910
10	77	126	106	204	186	310	500	440	640	990	420	820	750	1,240	2,010
12	85	138	115	223	205	340	550	480	700	1,080	460	900	820	1,360	2,200
14	92	149	125	241	220	365	595	520	760	1,170	500	970	880	1,470	2,380
16	98	159	132	258	235	390	635	555	810	1,250	530	1,040	940	1,570	2,540
18	104	168	140	273	250	415	675	590	860	1,330	560	1,100	1,000	1,670	2,690
20	110	178	150	288	265	440	710	620	910	1,400	590	1,160	1,050	1,760	2,840
22	115	186	158	302	275	460	745	650	950	1,470	620	1,220	1,110	1,840	2,980
25	122	198	168	322	295	490	795	690	1,020	1,560	660	1,300	1,180	1,960	3,180
30	134	217	182	353	325	540	870	760	1,120	1,710	730	1,420	1,290	2,150	3,480
35	145	235	198	380	355	580	940	820	1,210	1,850	790	1,530	1,400	2,320	3,760
40	155	251	210	405	370	620	1,000	880	1,290	1,980	840	1,640	1,490	2,480	4,020
45	164	267	223	430	395	660	1,060	930	1,370	2,030	890	1,740	1,580	2,630	4,260
50	173	280	235	455	415	690	1,120	980	1,440	2,140	940	1,830	1,670	2,780	4,490
60	190	310	260	500	455	760	1,230	1,080	1,580	2,340	1,030	2,010	1,830	3,040	4,920
70	205	350	280	525	490	810	1,280	1,140	1,710	2,530	1,110	2,170	1,970	3,280	5,310

Cuadro 1: Caudales estimados mediante un vertedero de orificio circular (Driscoll, F, 1989)