



TÉRMINOS DE REFERENCIA

PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS HIDRÁULICAS EN LAS CAPTACIONES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA JURISDICCIÓN DEL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ



**Subdirección Ambiental
Área Metropolitana del Valle de Aburrá**

Medellín, 2021



Futuro sostenible

f t i y @areametropol
www.metropol.gov.co

(57-4) 385 60 00
Carrera 53 N° 40A - 31
Medellín-Antioquia Colombia

TABLA DE CONTENIDO

1.	DEFINICIONES	4
2.	MARCO NORMATIVO	7
3.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS PRUEBAS HIDRÁULICAS.....	8
3.1	PRUEBAS DE BOMBEO	9
3.2	PRUEBAS DE RECUPERACIÓN (SLUG TEST).....	11
4.	METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE BOMBEO EN LA JURISDICCIÓN DEL AMVA	11
4.1	PRUEBAS DE BOMBEO PARA CAPTACIONES TIPO ALJIBE.	13
4.2	PRUEBAS DE BOMBEO PARA CAPTACIONES TIPO POZO.....	15
5.	TOMA DE MUESTRAS PARA EL ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DEL AGUA	18
6.	ESPECIFICACIONES DEL INFORME A PRESENTAR	20
	REFERENCIAS	21

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Intervalos de Tiempo Pruebas de bombeo (N.E Nivel Estático o nivel inicial del agua, antes de comenzar el bombeo).....	15
---	----

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de pruebas hidráulicas. (Fuente: Ambitest Ltda., 2015).	9
Figura 2. Gráfica para la prueba de bombeo tipo escalonado, sin recuperación entre escalones...	17

PRESENTACIÓN

Reconocer las características hidráulicas de un sistema acuífero es esencial para poder planear un aprovechamiento adecuado y sostenible del recurso hídrico subterráneo. En este sentido, los ensayos hidráulicos son el método recomendado para la determinación de las características hidráulicas de un sistema acuífero (Villanueva, 1984). Estos suelen ser efectuados en captaciones verticales y consisten en efectuar un bombeo de caudal (a tasa constante o variable) para medir el descenso del nivel del agua al interior de la captación y su recuperación (ascenso del nivel del agua en el pozo a caudal cero, es decir sin bombeo), con respecto al tiempo transcurrido hasta lograr la estabilización del respectivo nivel inicial. La información obtenida mediante la realización de las pruebas hidráulicas en captaciones de agua subterránea permite a la Autoridad Ambiental otorgar adecuadamente el caudal de aprovechamiento de la captación, de manera que no se genere afectación a las captaciones circundantes ni sobre la oferta del sistema acuífero.

El presente documento plantea una actualización a los términos de referencia para la realización de las pruebas hidráulicas asociadas a los procesos de solicitud de concesión de aguas subterráneas en la jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá -AMVA.

Estos términos de referencia proponen una serie de disposiciones generales que, con respecto a los términos de referencia anteriores, pretenden orientar el procedimiento para la realización de estas pruebas; específicamente en la selección del método según el tipo de captación y las condiciones propias de la unidad hidrogeológica a evaluar.

1. DEFINICIONES

- 1.1. **Abatimiento:** Diferencia entre el nivel estático y el nivel dinámico durante el bombeo.
- 1.2. **Acuífero Semiconfinado:** Un acuífero parcialmente confinado por capas de suelo de menor permeabilidad a través del cual la descarga y recarga puede todavía ocurrir.
- 1.3. **Acuífero Confinado:** Acuífero limitado en sentido vertical por rocas impermeables y sometido a una presión hidrostática superior a la atmosférica.
- 1.4. **Acuífero Libre:** Acuífero que tiene su límite superior definido por el nivel freático sometido a la presión atmosférica.
- 1.5. **Aforo:** Actividad mediante la cual se mide la cantidad de agua en unidad de tiempo o por capacidad.
- 1.6. **Aljibe:** Captación vertical excavada manualmente que tiene características de profundidad hasta 20 metros aproximadamente, diámetros superiores a 80 centímetros y revestimientos en anillos de concreto.
- 1.7. **Capacidad Específica:** Relación entre el caudal extraído de un pozo y el descenso del nivel dinámico. Generalmente se expresa en l/s/m.
- 1.8. **Coefficiente de Almacenamiento (S):** Es el volumen cedido o tomado del almacenamiento (acuífero), por unidad de agua superficial, cuando se produce un cambio unitario de área.
- 1.9. **Coefficiente de transmisividad (T):** Es la razón a la cual fluye a través de una franja vertical de un acuífero, de ancho unitario y de altura igual al espesor saturado del mismo, cuando el gradiente hidráulico es igual a 1, o sea 100%. También la transmisividad es igual a la conductividad hidráulica o permeabilidad multiplicada por el espesor saturado o espesor del manto acuífero. Las unidades son m²/día.
- 1.10. **Conductividad hidráulica (K):** Propiedad de un medio poroso que, de acuerdo con la ley de Darcy, relaciona el caudal específico con el gradiente hidráulico. Se entiende como la capacidad de un medio permeable para permitir el flujo de agua a través de sus intersticios.

- 1.11. Cono de Abatimiento:** Es el efecto hidráulico generado en el nivel del agua presente en el acuífero, luego de ejercer succión o abatimiento del agua por bombeo. Esta condición se define para un radio de influencia.
- 1.12. Nivel Dinámico:** Es el nivel alcanzado por el agua dentro del pozo medido desde superficie bajo condiciones de bombeo en función de tiempo.
- 1.13. Nivel Estático:** Es el nivel natural del agua dentro del pozo medido desde superficie cuando este no ha sido sometido a extracción de agua, como mínimo por un periodo de 24 a 48 horas.
- 1.14. Piezómetro:** es una perforación sin explotar que permite medir el nivel del agua subterránea en un punto determinado, se utiliza para conocer el estado cuantitativo del recurso hídrico.
- 1.15. Pozo de observación:** Es cada uno de los pozos ubicados dentro del radio de influencia de una captación en estudio, en los cuales se toman las medidas de niveles estáticos y/o dinámicos durante una prueba de bombeo con el fin de determinar la curva de abatimiento del acuífero y variables hidráulicas de la captación en estudio. Además, sirven para tomar registros periódicos de niveles y la toma de muestras de agua para monitorear la calidad de la misma. Los pozos de observación, pueden ser captaciones vecinas, dispuestas en el radio de influencia de la captación donde será efectuada la prueba.
- 1.16. Pozo Profundo:** Son captaciones de agua subterránea construidas mediante perforaciones mecánicas de gran profundidad en comparación con el diámetro, revestidas en PVC o acero y están dotadas de rejillas para captar las zonas permeables de los acuíferos. Su estructura es vertical, salvo algunas excepciones como los pozos radiales.
- 1.17. Prueba de Bombeo:** Es un ensayo realizado en un pozo o captación vertical que permite conocer el caudal óptimo de aprovechamiento, sus condiciones de operación y los parámetros hidráulicos del sistema acuífero - captación. Se realiza al final de la etapa exploratoria en caso de que sea satisfactoria y así establecer las condiciones hidráulicas de la captación, su caudal y el diseño del equipo de bombeo, y en las captaciones preexistentes, se realiza como parte del trámite para la legalización de la concesión de agua ante la Autoridad Ambiental.
- 1.18. Prueba de Recuperación:** Etapa de la prueba de bombeo que consiste en medir y registrar la evolución de los niveles del agua en ascenso, tanto en el pozo principal como en el (los) pozo(s) de observación, si existe(n), hasta llegar a una profundidad muy cercana al nivel estático.

- 1.19. **Radio de influencia:** Distancia del centro del pozo hasta los límites del área de influencia, donde el abatimiento es cero.
- 1.20. **Sondas Eléctricas:** Los instrumentos más usados para medir el nivel del agua, formadas por dos conductores, que al hacer contacto con el agua cierran el circuito y hacen que se accione un amperímetro, luz, alarma y/o combinación de ellos.
- 1.21. **Transmisividad:** Caudal a través de una sección de un acuífero de anchura unitaria bajo un gradiente hidráulico unitario.

2. MARCO NORMATIVO

La realización de pruebas hidráulicas es uno de los requisitos que contempla un Permiso de Prospección y Exploración de Aguas Subterráneas (Decreto 1076 de 2015, que compila el Decreto 1541 de 1978, cuyos artículos 145 y 146 guardan relación al tema aquí abordado). El permiso de exploración de aguas subterráneas se define como el permiso que requieren las personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, para realizar la actividad de Prospección y Exploración, la cual incluye perforaciones de prueba en busca de agua subterránea con miras a su posterior aprovechamiento; tanto en terrenos de propiedad privadas como en baldíos. Los permisos de exploración de aguas subterráneas no confieren concesión para el aprovechamiento de las aguas, pero darán prioridad al titular del permiso de exploración para el otorgamiento de la misma.

La normatividad ambiental nacional brinda soporte a la Autoridad Ambiental en los demás aspectos relacionados al otorgamiento del Permiso de Prospección y Exploración de Aguas Subterráneas, como, por ejemplo:

- **Decreto – Ley 2811 de 1974:** *“Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente”*. Artículos 23 y 121.
- **Ley 99 de 1993:** *“Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones”*. (Artículos 31, 66).
- **Resolución 2202 de 2005:** *“Por la cual se adoptan los Formularios Únicos Nacionales de Solicitud de Trámites Ambientales”*.
- **Resolución Metropolitana No. 2723 del 16 de diciembre de 2020:** *“Por la cual se adoptan los parámetros y el procedimiento para el cobro de tarifas por concepto de los servicios de evaluación y seguimiento ambiental”*.
- **Decreto 1076 del 2015:** *“Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible”, (Capítulo 2 Uso y Aprovechamiento del Agua artículos 2.2.3.2.5.3.; 2.2.3.2.9.1; 2.2.3.2.24.2; 2.2.3.2.8.5; 2.2.3.2.8.5; 2.2.3.2.1.1.7).*
- **Decreto 050 del 2018:** *“Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible en relación con los Consejos Ambientales Regionales de la Macrocuencas (CARMAC), el Ordenamiento del Recurso Hídrico y Vertimientos y se dictan otras disposiciones”;* concordante con lo dispuesto en la Resolución Ministerial 631 de 2015 *“Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los*

vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”.

- **Ley 373 de 1997:** *“por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua”.*
- **Decreto 1090 del 28 de junio de 2018** *“Por el cual se adiciona el Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro de Agua y se dictan otras disposiciones”.*
- **Resolución 1207 de 2014:** *“Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas”.*

Adicional a lo que establece la normatividad nacional, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá -AMVA cuenta con un “Formato básico de identificación de hoja de vida de trámites y servicios” para su jurisdicción, en el cual se disponen los requisitos mínimos necesarios para el otorgamiento del permiso de Prospección y Exploración de aguas subterráneas y para la respectiva concesión de aprovechamiento. Las condiciones y requisitos que debe cumplir el usuario al momento de una solicitud de este tipo ante el AMVA, por lo cual no serán abordados de manera detallada, salvo los criterios técnicos a considerar en la realización de las pruebas hidráulicas (ensayo de bombeo).

Es importante considerar que, al momento de realizar una prueba hidráulica para la solicitud de un permiso de aprovechamiento de agua subterránea, esta deberá ser realizada por personal capacitado y con experiencia para dicha labor. De manera previa a la realización de la prueba, el usuario debe notificar al AMVA, por lo menos 30 días (calendario) antes de la fecha estimada para realizar la prueba, para que sea programada la visita de supervisión correspondiente, por medio de la delegación de un técnico de la Entidad (Artículo 2.2.3.2.16.11 del Decreto 1076 de 2015).

3. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS PRUEBAS HIDRÁULICAS

Los ensayos hidráulicos en captaciones de agua subterránea, permiten caracterizar el comportamiento y flujo del agua almacenada en la unidad acuífera o del medio acuífero del cual se extrae el agua subterránea; pues es mediante el entendimiento de las características hidráulicas del medio captado, que se logra efectuar un aprovechamiento adecuado del recurso hídrico subterráneo, desde el punto de vista de la sostenibilidad ambiental. Por tal motivo, la aplicación de las pruebas hidráulicas tiene el propósito fundamental de obtener, con una precisión aceptable, los valores de las características hidráulicas del acuífero, tales como la conductividad hidráulica, la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento; para lo cual deben conocerse de manera previa, algunas características del medio captado.

Los ensayos hidráulicos empleados son las pruebas de bombeo para captaciones tipo pozo y las pruebas de recuperación para captaciones tipo pozo y aljibe. Las pruebas de bombeo pueden realizarse a caudal constante, bajo régimen variable o permanente, o a caudal variable, con bombeos escalonados (ver Figura 1); hasta alcanzar las condiciones de nivel dinámico en el pozo. Por su parte, en los aljibes se busca bombear el agua de la captación hasta lograr el vaciado o abatimiento total de la captación, punto a partir del cual finaliza la extracción de agua y se permite la recuperación de la captación para evaluar la capacidad hidráulica del medio acuífero; evaluado mediante la técnica sugerida del método del Slug Test.

Las pruebas de bombeo y/o recuperación, deben ser llevadas a cabo por personal capacitado, que cuenten con la experiencia y el conocimiento en el tema para su adecuado desarrollo.

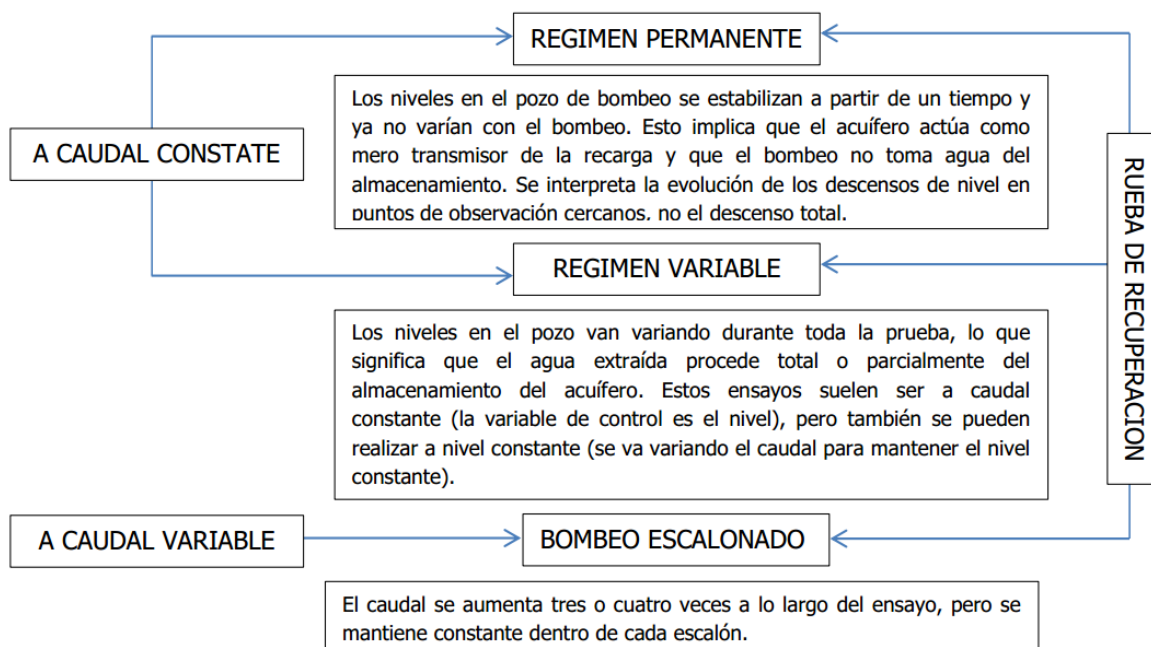


Figura 1. Tipos de pruebas hidráulicas. (Fuente: Ambitest Ltda., 2015).

3.1 PRUEBAS DE BOMBEO

Una prueba de bombeo es una prueba hidráulica que consiste en bombear una captación tipo pozo bajo un determinado régimen de caudal, para seguir el descenso del nivel del agua en el tiempo.

Las pruebas de bombeo pueden clasificarse en: Pruebas de bombeo a caudal constante, en régimen permanente, variable o transitorio; o a caudal variable o de tipo escalonado. Las pruebas de bombeo a caudal constante y en régimen permanente permiten obtener información relacionada al parámetro hidráulico de la transmisividad (T); mientras que las pruebas efectuadas a caudal variable permiten obtener, además, propiedades como la conductividad hidráulica (K) y coeficiente de almacenamiento (S) del acuífero; los radios de influencia y definir la ecuación del pozo para conocer su eficiencia y capacidad específica.

Por lo anterior, las pruebas de bombeo escalonado es el método de análisis más recomendado puesto que permite obtener la curva característica del pozo y, a partir de esto, definir el caudal de bombeo y consumo de energía óptimo para el usuario y la sostenibilidad del acuífero. Así, es posible escoger el tipo de bomba adecuada y determinar los tiempos de colmatación de la rejilla o de la zona filtrante, con lo que se logra un análisis económico sobre el comportamiento del pozo (evaluar caudal vs descenso vs potencia consumida por la bomba) (Domínguez, 2006).

Los resultados obtenidos suelen ser analizados empleando el método de Hantush (1964) para pozos que capten acuíferos semiconfinados, mientras que para el caso de captaciones en acuíferos confinados se emplean los métodos clásicos de Theis (1935) y Jacob (1967). En los acuíferos libres, suele asumirse que el espesor saturado de la unidad no cambia y bajo esta condición también puede ser empleado el método de Theis y Jacob.

Los métodos tradicionales para el análisis de pruebas de bombeo asumen que el almacenamiento en el pozo es insignificante; sin embargo, para aljibes no se pueden aplicar estos métodos. Papadopoulos ideó un método teniendo en cuenta el almacenamiento de agua en el pozo. Al principio de la prueba de bombeo, el abatimiento viene no solamente del acuífero sino también del mismo pozo de bombeo. El abatimiento inducido por el almacenamiento del pozo resulta significativo si los datos se interpretan con los métodos tradicionales. Sin embargo, algunas veces estos efectos son reducidos a medida que aumenta el periodo de bombeo y eventualmente no hay mucha diferencia cuando se compara con los resultados con el método de Theis para periodos largos de tiempo (CORPOURABA, 2008).

Los datos requeridos para aplicar la solución de Papadopoulos son los siguientes:

- Nivel estático.
- Tiempo Vs. Abatimiento en el pozo de bombeo.
- Dimensiones del pozo de bombeo.

- Profundidad.
- Diámetro.
- Describir método de ingreso de agua al pozo.
- Caudal de bombeo.

3.2 PRUEBAS DE RECUPERACIÓN (SLUG TEST)

La prueba de recuperación (*Slug Test*) es preferiblemente aplicada a captaciones tipo aljibe, las cuales presentan un mayor diámetro y una menor profundidad respecto a las captaciones tipo pozo, y normalmente no atraviesan todo el espesor del acuífero (se debe tener en cuenta que normalmente tampoco ocurre para los pozos). En los aljibes, el ingreso de agua se presenta por la parte inferior, lo que genera un almacenamiento de agua en su interior que afecta la interpretación de los resultados cuando son empleados los métodos de Theis y Jacob (Mace, 1999).

La prueba de recuperación (*Slug Test*) ocurre una vez el bombeo o extracción de agua del interior de la captación es completada y se logra el vaciado de la misma. En aljibes, dada su poca eficiencia, el nivel del agua desciende muy rápido mientras que la recuperación es muy lenta (CORPOURABA, 2008). Por tal motivo, el bombeo en un aljibe se hace hasta que el nivel del agua descienda totalmente y se logre el abatimiento total de la captación. A partir de este punto, el bombeo es suspendido y se permite la recuperación de la captación mediante el ascenso del nivel del agua; hasta que este alcance, como mínimo, el 90% del nivel inicial medido al comienzo de la prueba.

Los datos del cambio en la altura del nivel del agua al interior de la captación, es decir, el descenso y ascenso de la lámina de agua en el tiempo, son graficados para obtener la curva característica. Con esto se conoce la eficiencia en la recuperación de la captación, lo cual se relaciona con las características hidráulicas del medio acuífero que capta. Los parámetros del acuífero que se pueden obtener a partir de la prueba de recuperación son: conductividad hidráulica (K) y transmisividad (T).

La interpretación de los resultados de esta prueba, debe realizarse empleando los métodos propuestos por Cooper-Bredehoelf-Papadopoulos (1967), Hvorslev (1951) y Bouwer-Rice (1989).

4. METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE BOMBEO EN LA JURISDICCIÓN DEL AMVA

De manera previa a definir los pasos a seguir en la realización de una prueba hidráulica, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. Realizar una descripción de las condiciones hidrológicas de los días previos a la prueba y durante el desarrollo de esta. Para este análisis se puede utilizar la información generada en las estaciones de monitoreo de SIATA.
2. Conocer las condiciones del clima como temperatura, precipitación, humedad, entre otros, tanto para el día de la prueba como los días anteriores.
3. Conocer las características de la unidad acuífera que es interceptada por la captación donde será aplicada la prueba (acuífero tipo libre, semiconfinado o confinado), además el diseño y las dimensiones de la captación vertical.
4. Tener presente si en las inmediaciones del lugar donde se va a realizar la prueba existen otras captaciones de agua subterránea que podría afectar el nivel de la captación a evaluar y las condiciones de la prueba.
5. Determinar que la captación no fue utilizada durante las últimas 24 horas, como mínimo; garantizando que la captación se encuentre en su Nivel Estático (N.E) y no en estado dinámico o en recuperación. A continuación, se procede a tomar el nivel del agua en la captación que correspondería al nivel inicial del agua, teniendo en cuenta que la boca de la captación se encuentre al nivel del terreno o por encima del mismo.
6. Tomar las medidas necesarias de seguridad (casco, línea de vida, botas con puntera, gafas, chaleco reflectivo, guantes, ARL vigente); luego proceder a revisar y verificar que los equipos y las herramientas necesarias para la generación de la prueba se encuentren disponibles y en buenas condiciones para la prueba de bombeo.
7. Contar con los instrumentos adecuados para toma de medidas de caudal, tiempo y de nivel del agua (sonda de nivel calibrada), así como para el registro de los datos de la variación en el nivel del agua a interior de la captación respecto al tiempo.
8. Conocer las características de la bomba con la que será efectuada la prueba de bombeo, es decir, su capacidad y profundidad de instalación; así como verificar que esta se encuentre en óptimas condiciones de calidad, ya que durante la realización de la prueba esta no puede apagarse. Si esto ocurre, se debe esperar que el pozo se recupere y comenzar nuevamente el ensayo.
9. Determinar el tipo de prueba a realizar, considerando el caudal a ser requerido y el tipo de captación. Estas pueden ser a caudal constante o escalonado.
10. La bomba debe ser capaz de operar continuamente por tres (3) o cuatro (4) días a una descarga constante, en caso de que la prueba se prolongue (la prueba finaliza cuando la recuperación alcance mínimo el 90% del nivel inicial). Para ambos tipos de captación se realizará el ejercicio de bombeo y recuperación.
11. Es recomendable que, para evaluar las características hidráulicas del acuífero, se cuente con pozos de observación para que sea posible hacer seguimiento a las variaciones del nivel piezométrico en las inmediaciones o radio de influencia del

- pozo analizado, mientras se realiza la prueba. En caso de que el (los) pozo(s) de observación pertenezcan a usuarios vecinos, estos deben ser informados de manera previa a la realización de la prueba.
12. Presentar los diseños del pozo de observación o piezómetro para garantizar que se está interviniendo la misma unidad acuífera de la captación de agua subterránea, respecto a la del pozo de bombeo. De esta forma, se podrán medir abatimientos más representativos por efecto del bombeo realizado en el ensayo.
 13. La capacidad de la bomba y la magnitud de la descarga, deberán ser lo suficientemente grandes para producir abatimientos medibles en el pozo de bombeo y piezómetros ubicados a distancias de entre 10 y 100 m del pozo de extracción (si los hubiese).
 14. Cabe aclarar que no es obligación tener pozos de observación.
 15. Se debe contar con un lugar adecuado para la disposición del agua que será extraída durante la realización de la prueba hidráulica, pues se debe garantizar que esta no ingrese de nuevo a la captación generando interferencias que puedan arruinar la prueba.
 16. Para caudales superiores a 5,0 l/s es necesario instalar medidor de flujo de caudal, con el fin de evitar errores en la toma de datos, para caudales menores se puede realizar el aforo volumétrico, teniendo en cuenta los elementos adecuados para realizar dicho aforo.

En cuanto a la duración de la prueba hidráulica, no es posible ni resulta conveniente establecer un límite de tiempo que aplique a todos los casos, puesto que el tiempo de bombeo depende del tipo de acuífero y del nivel de detalle requerido para evaluar las características hidráulicas y condiciones propias de cada captación. En la mayoría de los casos, el bombeo suele ser hasta lograr nivel constante; con una posterior prueba de recuperación en la que se logre obtener, mínimamente, el 90% del nivel inicial del agua al momento de iniciar la prueba, bajo condiciones de flujo permanente.

4.1 PRUEBAS DE BOMBEO PARA CAPTACIONES TIPO ALJIBE

Para realizar la prueba hidráulica en captaciones tipo aljibe, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos, además de las generalidades presentadas en el numeral previo:

- A. Ubicar la captación en la que se ha de realizar la prueba de bombeo para acondicionar el lugar de trabajo y determinar los equipos que serán requeridos para el correcto desarrollo de la misma.
- B. Instalar el equipo de bombeo a emplear, en caso de que la captación no disponga de bomba propia, y la sonda de medición de nivel piezométrico con la que se tomarán las medidas de descenso y ascenso (recuperación) en la prueba. Para evitar errores en la determinación del nivel del agua al interior de aljibe, se recomienda emplear sonda eléctrica, dotada de electrodo en el extremo y de

- graduación milimétrica en la cinta métrica. La prueba debe realizarse a caudal constante y hasta lograr el abatimiento total de la captación.
- C. De manera previa a la realización de la prueba, debe conocerse la profundidad de la captación, la capacidad de la bomba con la que será realizada la prueba (por catálogo y verificada por aforo en el sitio) y la profundidad a la que se encuentra instalada. Asimismo, se debe tener información referente al medio acuífero que está siendo captado por el aljibe, tal y como se mencionó en las recomendaciones generales presentadas en el numeral anterior; por ejemplo, el espesor de la unidad.
 - D. Registrar la hora y realizar la medida inicial del nivel del agua en el interior del aljibe, antes de encender la bomba. Se debe garantizar el nivel estático (NE) al iniciar la prueba.
 - E. Una vez definidas las condiciones iniciales y generales de la prueba, se procede a dar inicio a la misma por medio del encendido de la bomba de succión. La toma de niveles debe ser inmediata, una vez comienza la extracción, puesto que el descenso del agua suele ser bastante rápido al inicio. Por esto, la recomendación es tomar los primeros registros de variación de nivel del agua cada 30 segundos o cada minuto, aumentando paulatinamente según se comienza a estabilizar el nivel del agua en la captación, tal y como se propone en la (Tabla 1), a continuación. Cabe destacar que la frecuencia propuesta en este documento es meramente orientativa. Sin embargo, quien realice la prueba debe tener presente que lo importante es registrar los datos necesarios para la correcta interpretación de la prueba, indicando siempre los niveles y tiempo al cual corresponden; especialmente los de recuperación.
 - F. Cualquier suceso ocurrido durante la realización de la prueba debe ser registrado con el mayor detalle posible y reportado en el informe para la correcta interpretación de los datos.
 - G. Durante la prueba, es recomendable realizar chequeos del caudal extraído cada hora, valiéndose del medidor del que disponga la captación o de otros métodos de aforo en caso de que no se cuente con medidor continuo de caudal en el sitio.
 - H. Se debe garantizar que el agua extraída no sea vertida directamente sobre la superficie del suelo cercana al aljibe, ya que puede generar una recarga y alterar los resultados del ensayo, esta debe ser almacenada en tanques o vertida al sistema de alcantarillado o drenada a la corriente de agua más cercana.
 - I. El bombeo en captaciones tipo aljibe debe efectuarse hasta secar la captación o hasta que el nivel piezométrico al interior del aljibe se haga constante (caudal de bombeo igual al caudal de ingreso a la captación desde la unidad acuífera). Por ningún motivo debe verse interrumpido el bombeo hasta haber alcanzado esta condición, de lo contrario la prueba deberá repetirse.
 - J. Alcanzado el nivel constate o el abatimiento total de la captación tipo aljibe, confirmado mediante el registro de varios niveles iguales, se apaga la bomba y se da inicio a la prueba de recuperación (*Slug Test*). Por facilidad, se puede considerar la misma frecuencia de tiempo para la toma de datos de nivel en la recuperación (Tabla 1). Sin embargo, es importante tener presente que esta prueba suele ser en

ocasiones más rápida que la de abatimiento, por lo que a veces se hace necesario definir intervalos de medición más frecuentes para la recuperación de los primeros metros de la captación.

- K. Los valores de ascenso del nivel piezométrico o recuperación del aljibe deben ser medidos hasta obtener mínimamente el 90% del abatimiento total. Estos registros se deben consignar en el “Informe de resultados de la prueba de bombeo”, en una columna paralela a la del bombeo, con los respectivos tiempos en los que fueron tomados dichos niveles.

Finalizada la prueba, se debe realizar el informe con los datos obtenidos del abatimiento y recuperación de la captación, consignados en el formato Anexo “Informe de resultados de la prueba de bombeo”. El informe debe hacerse llegar a la Autoridad Ambiental en un plazo, no mayor, a los 15 días hábiles, al igual que el reporte de resultados de laboratorio acreditado ante el IDEAM que realizó los análisis de calidad del agua para aquellos usos que la norma lo exige.

Tabla 1. Intervalos de Tiempo Pruebas de bombeo (N.E Nivel Estático o nivel inicial del agua, antes de comenzar el bombeo).

Numero de lectura	Tiempo	Numero de lectura	Tiempo
1	0.0 (N.E)	18	1 hora
2	30 segundos	19	1 hora 20 minutos
3	1 minuto	20	1 hora 40 minutos
4	2 minutos	21	2 horas
5	3 minutos	22	2 horas 30 minutos
6	4 minutos	23	3 horas
7	5 minutos	24	4 horas
8	6 minutos	25	5 horas
9	8 minutos	26	7 horas
10	10 minutos	27	9 horas
11	12 minutos	28	13 horas
12	15 minutos	29	19 horas
13	20 minutos	30	25 horas
14	25 minutos	31	31 horas
15	30 minutos	32	39 horas
16	40 minutos		
17	50 minutos		
La prueba debe continuar hasta alcanzar nivel constante.			

4.2 PRUEBAS DE BOMBEO PARA CAPTACIONES TIPO POZO

En el caso de pozos profundos, las pruebas de bombeo pueden ser realizadas bajo condiciones de caudal constante a régimen permanente o variable. El análisis de este tipo de prueba puede efectuarse empleando los métodos de Theis y Jacob, los cuales están basados en un planteamiento que considera el ajuste gráfico presentado en el Anexo 3 de este documento.

Para el caso de las captaciones provenientes de un pozo profundo, se debe aplicar una prueba de bombeo a caudal variable de tipo escalonado, sin recuperación entre escalones (ver Figura 2). Este tipo de prueba consiste en efectuar bombeos a distinto caudal, los cuales podrían recomendarse como: Q1 al 50%, Q2 al 100% y Q3 al 150% del caudal que desea solicitarse para la concesión, definiendo tres (3) escalones. Cada escalón en periodos de tiempo de 10 a 12 horas, siempre y cuando sean idénticos entre ellos cuando se trate de una misma prueba. Es importante tener en cuenta que, cada vez que se hace un cambio de caudal, la toma de datos debe ser tal y como se efectúa al inicio de la prueba; y que la información correspondiente al último escalón, podrá ser analizada por medio del método de Theis y Jacob.

El planteamiento teórico para la interpretación de resultados también se presenta en el Anexo 3. En el Anexo 3.4 del presente documento se presenta una breve explicación del cálculo de la eficiencia de un pozo cuando es aplicado el método escalonado de bombeo, a partir del cual es posible obtener la curva característica del pozo y de esta manera determinar el caudal óptimo de bombeo y la eficiencia de la captación.

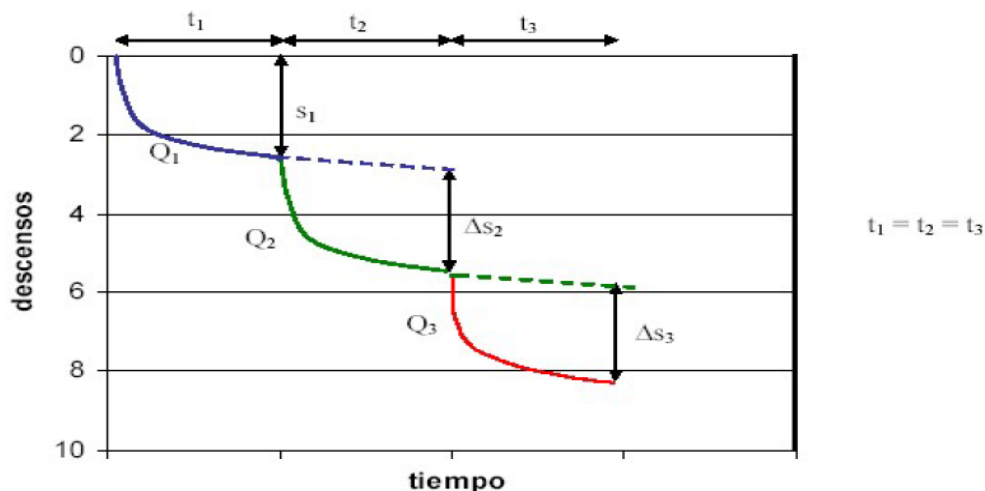


Figura 2. Gráfica para la prueba de bombeo tipo escalonado, sin recuperación entre escalones.

Además de las recomendaciones generales para la realización de pruebas de bombeo, que fueron indicadas al comienzo del numeral 4 del presente documento, se plantean las siguientes orientaciones para dichas pruebas bajo el régimen de caudal variable de tipo escalonado sin recuperación entre escalones, que se recomienda específicamente aplicar en captaciones tipo pozo.

- Registrar la hora y realizar la medida inicial del nivel del agua en el interior del pozo, antes de encender la bomba. Este nivel debe corresponder al Nivel Estático (N.E) pero de no ser así, igual deberá indicarse el valor y el nivel que corresponde (Estático o Dinámico).
- La prueba de bombeo deberá ser escalonada a tres ciclos, con 10 y 12 horas de duración cada uno. Y caudales aumento de delta constante (Q_1 al 50%, Q_2 al 100% y Q_3 al 150% del caudal que desea solicitarse para la concesión).
- El aforo de verificación del caudal extraído por la bomba no podrá realizarse por el método volumétrico sino a través de un macromedidor, el cual debe contar con constancia de calibración y sus registros estar disponibles al momento de la prueba.
- Para dar comienzo a la prueba se enciende la bomba y se inicia el bombeo.
- El descenso del nivel de agua es medido con la sonda eléctrica. El registro de los niveles del agua en la prueba de bombeo a caudal escalonado, se debe efectuar de acuerdo con lo establecido en la Tabla 1. Intervalos de Tiempo Pruebas de bombeo (N.E Nivel Estático o nivel inicial del agua, antes de comenzar el bombeo). Es decir, el caudal extraído del pozo se mantiene constante durante un tiempo, luego cambiará súbitamente a otro caudal que se mantendrá constante durante otro tiempo, para volver a cambiar a un tercer caudal durante un tercer espacio de tiempo, en escalones como se observa en la Figura 2. Gráfica para la prueba de

- bombeo tipo escalonado, sin recuperación entre escalones, el último escalón puede analizarse bajo el método de Theis y Jacob.
- F. Cualquier suceso ocurrido durante la realización de la prueba debe ser registrado con el mayor detalle posible y reportado en el informe para la correcta interpretación de los datos.
 - G. Durante la prueba, es recomendable realizar chequeos del caudal extraído cada hora.
 - H. Se debe garantizar que el agua extraída no sea vertida directamente sobre la superficie del suelo cercana al pozo, ya que puede generar una recarga y alterar los resultados del ensayo, esta debe ser almacenada en tanques o vertida al sistema de alcantarillado o drenada a la corriente de agua más cercana.

5. TOMA DE MUESTRAS PARA EL ANÁLISIS FISCOQUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DEL AGUA

El proceso de solicitud de la concesión de aguas según la ley, mediante el cual la Autoridad Ambiental otorga la concesión, implica el análisis fisicoquímico y microbiológico del agua para determinar si esta cumple con las condiciones que establece la legislación nacional para ser destinada a un uso en específico.

Para realizar la adecuada toma de las muestras de agua para el análisis de las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua de la captación, se debe prever garantizar la adecuación de los materiales, equipos y formatos necesarios. La toma de la muestra debe hacerse directamente del caudal bombeado desde la captación. El personal que realiza la prueba debe ser idóneo y estar debidamente capacitado y certificado para el efecto y, el análisis o caracterización fisicoquímica y/o bacteriológica respectiva, deberá ser efectuado en un laboratorio acreditado (vigente a la fecha) por el IDEAM, en los parámetros solicitados a evaluar.

Formatos: El Laboratorio seleccionado para el análisis de la muestra, donde pretende llevar las muestras para su respectivo análisis, proporciona y dispone de los respectivos formatos donde deben ser consignados los datos relacionados al sitio de muestreo. Entre ellos, un formulario para el registro de la información general del monitoreo, denominado cadena de custodia, que debe presentarse al momento de entregar las muestras correspondientes al laboratorio y sin el cual el laboratorio no se hace responsable por los resultados obtenidos en el análisis y reportados en su informe.

El formato de la cadena de custodia, debe contener información correspondiente a la fecha, hora y lugar de la toma de muestras; la empresa solicitante, el responsable y la información de los parámetros medidos *in situ*; para la comparación de estos respecto a los obtenidos en el análisis efectuado en el laboratorio

Recipientes: Para el almacenamiento de muestras, el laboratorio indicará y/o proporcionará los recipientes y las soluciones a aplicar para lograr una adecuada preservación de las muestras hasta el momento de la entrega.

Toma de muestras: El paso a paso que debe seguir el usuario para la toma de las muestras es el siguiente:

Para la toma de medición *in situ*: en un recipiente, debidamente purgado o enjuagado con agua destilada, tome una cantidad de agua producto del bombeo. La toma de la muestra se debe realizar cuando la conductividad eléctrica producto del bombeo se haya estabilizado, en ese momento se realiza las mediciones *in situ* de los parámetros pH, Oxígeno Disuelto, Temperatura del agua y Conductividad eléctrica y luego se toma la muestra para el análisis en el laboratorio.

Para la toma de muestra de agua para el análisis en laboratorio:

- Purgue tres veces los recipientes con el agua recolectada.
- Complete nuevamente el volumen del recipiente con agua producto del bombeo, para proceder a llenar las botellas que serán enviadas al laboratorio para el respectivo análisis fisicoquímico
- Seque y pegue las etiquetas a los recipientes que tiene disponibles para el análisis fisicoquímico y bacteriológico, que contenga mínimo la siguiente información: Tipo de muestra, Número de muestra, Fecha de monitoreo, procedencia del agua y lugar de monitoreo.
- Las muestras para análisis microbiológico se toman directamente del caudal bombeado.
- Agregue el preservante a las muestras, que así lo requieren, de acuerdo a las indicaciones dadas por el laboratorio para el parámetro a analizar y el lugar donde se va a realizar el respectivo análisis.
- Colocar los recipientes llenos dentro de una nevera y agregar hielo suficiente para refrigerar y mantener una temperatura de 4.0 °C, aproximadamente. Si va a hacer enviada la nevera completa, rotule en un costado con los siguientes datos; nombre del laboratorio, teléfono y dirección.
- **Condiciones de transporte de las muestras:** Las muestras deben ir refrigeradas y en neveras de *poliestireno expandido*; debidamente rotuladas y con el formato correspondiente a la cadena de custodia diligenciado, según indique el laboratorio.
- **Parámetros a analizar requeridos para anexar a la solicitud de concesión de agua:** Los parámetros fisicoquímicos y/o biológicos que se deben presentar ante el AMVA para la solicitud de una concesión de agua subterránea, son para aquellos usos que tengan criterios de calidad definidos por la normativa ambiental, para lo cual deberán presentar una caracterización que demuestre cumplimiento de dichos parámetros.

Con esta información, el técnico encargado de evaluar la prueba por parte del AMVA, determinará si el agua cumple o no para el uso requerido por el usuario; en función de las concentraciones que establece la normatividad nacional para el mismo (Decreto 1076 de 2015). Se debe tener en cuenta que el uso requerido es el que se solicitó a la Autoridad Ambiental en el respectivo trámite y que, por tal razón, la concesión obtenida no debe ser empleada para satisfacer un uso diferente al solicitado y analizado durante el trámite.

En caso de evidenciarse contaminación puntual en las captaciones existentes, la Autoridad Ambiental podrá solicitar al usuario el análisis de parámetros más específicos necesarios para la toma de decisiones en el otorgamiento de la concesión.

6. ESPECIFICACIONES DEL INFORME A PRESENTAR

El usuario debe presentar la información de la prueba de bombeo en el formato correspondiente que se encuentra anexo a este documento. Dicho informe será el insumo que tendrá la Autoridad Ambiental para evaluar las condiciones hidráulicas, fisicoquímicas, bacteriológicas y ambientales de la captación en la que se realizó la prueba y para la que se solicita la concesión de agua; con el fin de considerar los deberes y derechos de otros usuarios que ya tienen concesión vigente y los cambios generados a través del tiempo, respecto a las condiciones iniciales de la captación.

El informe a ser presentado por el usuario ante el AMVA, debe contener el formato de campo diligenciado con la información requerida, que soporte los resultados logrados durante la realización de la prueba (ver formatos de campo anexo). Este representa un insumo fundamental para la evaluación e interpretación de los resultados obtenidos; lo cual condicionará el caudal otorgado para la concesión.

REFERENCIAS

C. V. Theis. (1935). The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate Duration of Discharge of Well Using Ground-water Storage. Trans. Am. Geophysical Union, V. 16, 1935. 519-524 p.

E. R. Domínguez. (2006). Procedimiento para la Prueba de Bombeo: Escalonado y de Larga Duración. Universidad Tecnológica de Panamá. Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas.

H. Bouwer (1978). Groundwater Hydrology. New York: Mc Graw-Hill.

H. Bouwer. (1989). The Bouwer and Rice slug test--an update, Ground Water, vol. 27, no. 3, pp. 304-309.

H.H. Cooper, J.D. Bredehoeft and S.S. Papadopoulos. (1967). Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water, Water Resources Research, vol. 3, no. 1, pp. 263-269.

Lineamientos para la exploración y explotación de las aguas subterráneas en El Eje Bananero de Urabá. (2008). Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá. Corpourabá.

Lineamientos para exploración y perforación, realización de pruebas de bombeo y mantenimiento y limpieza de captaciones de aguas subterráneas. (2011). Red de monitoreo ambiental en la cuenca hidrográfica del río Aburrá - Medellín En jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Fase III. Anexo 3. Área Metropolitana del Valle de Aburrá-AMVA, Universidad de Antioquia –UdeA, Universidad Nacional de Colombia –UNAL, Universidad Pontificia Bolivariana –UPB, Universidad de Medellín -UdeM.

M.J. Hvorslev. (1951). Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations, Bull. No. 36, Waterways Exper. Sta. Corps of Engrs, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, pp. 1-50.

M. V. Vélez. (1999). Hidráulica de Aguas Subterráneas. 2da Edición. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.

M. Villanueva; A. Iglesias. (1984). Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. Instituto geológico y minero de España.

Procedimiento para Pruebas de Bombeo (2015). Laboratorio Ambiental del Casanare. Ambitest Ltda.

R.E. Mace. (1999). Estimation of Hydraulics Conductivity in Large Diameter; Hand-Dug Wells using Slug-Test Methods. Journal of Hydrology 212.pp. 34-45.