

Guía para el diseño y construcción de pozos de captación de aguas subterráneas



Guía para el diseño y construcción de pozos de captación de aguas subterráneas

Madrid, Junio de 2026

Título:

Guía para el diseño y construcción de pozos de captación de aguas subterráneas

Dirección y coordinación:

Francisco Javier Sánchez Martínez (MITECO)

Pablo García Cerezo (MITECO)

Carolina Guardiola-Albert (AIH-GE)

Sergio Martos-Rosillo (AIH-GE)

Autores:

Sergio Martos-Rosillo (Instituto Geológico y Minero de España, CSIC)

Alfredo Barón Pérez (Asociación de Geólogos de las Islas Baleares, AGIB)

Carolina Guardiola-Albert (Instituto Geológico y Minero de España, CSIC)

Marc Martínez Parra (Especialista en Hidrogeología)

Tomás García Ruíz (Compañía General de Soporte a la Ingeniería)

José Antonio Domínguez Sánchez (Instituto Geológico y Minero de España, CSIC)

Ángel Cantudo Muñoz (AQUATEC)

Juan Antonio Hernández Bravo (Diputación de Alicante)

Alfredo Iglesias López (Real Academia de Doctores de España)

José David Comino Martínez (Agencia Catalana del Agua)

Antonio Nicolás Martínez Sánchez de la Nieta (Instituto Geológico y Minero de España, CSIC)

Alfredo Pérez-Paricio (Agencia Catalana del Agua)

Jordi Pujadas Ferrer (JPF Consultores)

Juan José Alfageme Herrero (MITECO)

Luis García Crespo (MITECO)

Fotografía de cubierta e introducción:

Equipo de perforación realizando un sondeo y detalle del ensayo de bombeo (Sierra de Estepa, Sevilla). Autor: Sergio Martos-Rosillo (Instituto Geológico y Minero de España, CSIC). Labores de perforación (Petrer, Alicante). Autor: Gabriel Gallardo Lozano (TRAGSATEC)



MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL
RETO DEMOGRÁFICO

DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL
DE PROTECCIÓN DE LAS AGUAS
Y GESTIÓN DE RIESGOS

Edita:

© SUB SECRETARÍA
Gabinete Técnico

Edita:

© Secretaría General de Innovación
Gabinete Técnico

© De los textos e imágenes: sus autores

NIPO (línea en castellano): en trámite

Índice

1. Introducción y finalidades de esta guía	9
2. Planificación para la realización de un pozo de captación de agua subterránea	13
2.1. Aspectos generales	13
2.2. Estudio hidrogeológico	14
2.3. Diseño de la captación	14
2.4. Elaboración del proyecto constructivo.....	14
2.5. Gestión de permisos y tramitación de la obra	14
2.6. Ejecución de la obra	15
2.7. Ensayo de bombeo y evaluación del caudal y de la calidad del agua.....	15
2.8. Informe final de la ejecución del sondeo	15
2.9. Equipamiento electromecánico	16
2.10. Protección sanitaria y desinfección final.....	16
2.11. Sellado y clausura.....	16
3. Contenidos y resultados del estudio hidrogeológico	17
3.1. ¿Qué debe contener el estudio hidrogeológico previo a un sondeo?	17
3.2. ¿Qué resultados se deben conseguir con el estudio hidrogeológico?	17
4. Recomendaciones para el diseño de sondeos de captación de agua subterránea	18
4.1. Introducción.....	18
4.2. Aspectos a considerar antes del diseño de un sondeo	18
4.3. Diámetros	20
4.4. Diseño de sondeos en rocas cristalinas o rocas duras.....	24
4.5. Diseño de sondeos en rocas consolidadas	27
4.6. Diseño de sondeos en formaciones no consolidadas	28
5. Tramitación legal para la construcción y aprovechamiento de un pozo de captación de agua subterránea	32
5.1. Introducción.....	32
5.2. Marco legal.....	32
5.2.1. Legislación de aguas.....	32
5.2.2. Legislación de minas y legislación de riesgos laborales.....	37
5.2.3. Legislación de régimen local	39
5.2.4. Legislación medioambiental.....	39
5.3. Trámites	40
5.3.1. Propietario del terreno	40
5.3.2. Ayuntamiento	40
5.3.3. Organismo autonómico competente en materia de minería	41
5.3.4. Organismo autonómico competente en materia de industria.....	41
5.3.5. Confederación hidrográfica u organismo autonómico competente en materia de aguas	42
5.3.6. Organismo administrativo de medioambiente.....	43
5.4. Ejemplos de tramitación administrativa.....	43
5.4.1. Demarcación Hidrográfica de las Islas Baleares	43
5.4.2. Cuencas Internas de Cataluña.....	45
5.4.3. Comunidad de Madrid.....	47
5.4.4. Comunidad Valenciana	47
5.4.5. Comunidad Autónoma de Andalucía.....	48

6. Propuesta de contenidos de los documentos técnicos necesarios para la perforación de un sondeo.....	49
7. Construcción y evaluación cuantitativa y cualitativa del pozo.....	56
7.1. Condicionantes a considerar en la ubicación de un sondeo	56
7.2. Control de perforación, testificación y auscultación de sondeos.....	58
7.2.1. Conceptos generales	58
7.2.2. Control de la fase de ejecución.....	59
7.2.3. Testificación geológica	60
7.2.4. Testificación geofísica	60
7.2.5. Control de la desviación del sondeo	64
7.3. Entubado.....	67
7.3.1. Consideraciones previas.....	67
7.3.2. Selección de la tubería	68
7.3.2.1. Resistencia físico-química	68
7.3.2.2. Resistencia mecánica	71
7.3.3. Rejillas o filtros.....	78
7.3.4. Instalación de la columna de entubación	87
7.4. Macizos de grava	91
7.4.1. Introducción	91
7.4.2. Dimensionado de prefiltros de grava en sondeos con formaciones acuíferas arenosas	93
7.4.3. Procedimientos de instalación del prefiltro de grava	96
7.5. Cementación y productos sellantes.....	100
7.5.1. Introducción	100
7.5.2. Lechadas de cemento y de bentonita	101
7.5.3. Otros productos sellantes	103
7.5.4. Procedimientos de cementación.....	104
7.5.5. Esquemas y profundidades de cementación	108
7.6. Ensayos de bombeo	109
7.6.1. Introducción	109
7.6.2. Definición y objetivos de los ensayos de bombeo.....	109
7.6.3. Programación y ejecución de ensayos de bombeo	110
7.6.3.1. Conocimiento geológico e hidrogeológico.....	110
7.6.3.2. Estudios previos y trabajos auxiliares.....	110
7.6.3.3. Características de los piezómetros de observación.....	111
7.6.4. Selección de los medios humanos y del material adecuado para la ejecución de un ensayo de bombeo.....	112
7.6.4.1. Equipo técnico	112
7.6.4.2. Equipos de ensayo de bombeo	112
7.6.5. Programa de bombeo y mediciones.....	115
7.6.5.1. Aspectos previos al ensayo	115
7.6.5.2. Ensayos de bombeo escalonados.....	115
7.6.5.3. Ensayos de bombeo de larga duración.....	117
7.6.5.4. Partes de bombeo y mediciones	119
7.6.5.5. Control de parámetros físico-químicos y toma de muestras de agua.	119
7.6.6. Interpretación de los ensayos de bombeo y elaboración del informe final del ensayo	120
7.7. Protección sanitaria del pozo.....	121

7.7.1. Introducción	121
7.7.2. Sello sanitario o losa de cimentación	121
7.7.3. Cierre de la cabeza del sondeo.....	123
7.7.4. Caseta de protección	124
7.8. Desinfección	125
7.8.1. Introducción	125
7.8.2. Criterios de buenas prácticas para evitar la contaminación bacteriológica del pozo	126
7.8.3. Productos desinfectantes y dosificación	126
7.8.4. Aplicación del desinfectante	128
8. Informe final.....	129
8.1. Introducción	129
8.2. Contenido del informe final de un sondeo	130
8.3. Ficha de inventario de pozos.....	131
Referencias mencionadas en el texto.....	132
Referencias normativas.....	134
Anexo I. Normativa internacional.....	136
África	136
América	137
Canadá.....	138
Estados Unidos.....	139
Australia.....	142
Europa	142
Anexo II. Cualificación requerida para las empresas y el personal dedicado a la construcción de sondeos.....	143
En el ámbito nacional.....	143
En el ámbito internacional.....	145
Australia.....	145
Estados Unidos.....	146
Canadá.....	148
Francia.....	149
Anexo III. Parte de bombeo.....	151
Anexo IV. Ficha de Inventario de Puntos de Agua del Instituto Geológico y Minero de España (IGME)	154



1. Introducción y finalidades de esta guía

La excavación de pozos en el terreno para extraer agua del subsuelo es una de las primeras técnicas de construcción realizadas por el ser humano. Los pozos más antiguos que se conocen se encontraron en la isla de Chipre y cuentan con unos 11.000 años de antigüedad. Tienen profundidades inferiores a los 13 m y diámetros comprendidos entre 1,0 y 1,5 m, dado que este rango de diámetros es el mínimo requerido para que una persona pueda excavar en su interior. Puede que el pozo más antiguo de España sea el enigmático pozo que se descubrió en el año 2005 al final de la cámara megalítica del dolmen de Menga, en Antequera (Martos-Rosillo et al., 2018). Se trata de un pozo muy parecido a los encontrados en Chipre, con un diámetro similar y con unos 20 m de profundidad. Aún no se conoce a ciencia cierta si el pozo es coetáneo a la construcción del dolmen. Si fuese así, estaríamos hablando de un pozo de 7.700 años de antigüedad. Le seguiría en antigüedad el espectacular pozo de la Motilla del Azuer (Daimiel, Ciudad Real), con una profundidad de 20 m y una antigüedad comprendida entre 3.800 y 4.000 años (Mejías et al., 2015).

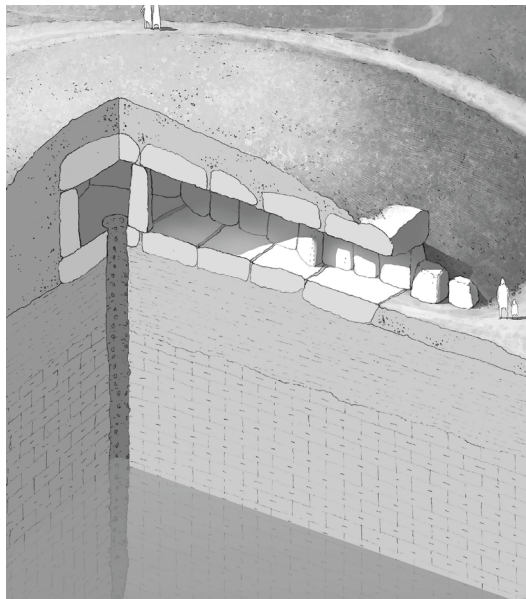


Figura 1.1. Esquema constructivo del pozo del Dolmen de Menga (Martos-Rosillo et al., 2018).

La construcción de pozos empezó a proliferar en nuestro planeta de forma gradual hasta que, en la segunda mitad del siglo XX, el crecimiento pasó a ser exponencial. Este brusco aumento en la construcción del número de pozos se debió a cuatro factores fundamentales:

1. Las condiciones climáticas de nuestro planeta volvieron a ser cálidas y secas.
2. El ser humano adquirió un conocimiento científico y tecnológico del medio subterráneo que no había tenido hasta la fecha.
3. Comenzaron a comercializarse bombas electro-sumergibles, más efectivas y asequibles económicamente.
4. Se produjo un notable avance y una fuerte reducción de costes de las técnicas de perforación, que son más efectivas. Se pasó entonces a construir perforaciones de mucho menor diámetro y mayor profundidad que los antiguos pozos excavados a mano, en las que se podían introducir bombas electro-sumergibles, con diámetros inferiores a los 500 mm, con las que poder elevar importantes caudales de agua a cientos de metros de altura. Los esquemas constructivos pasaron del antiguo pozo excavado a mano al sondeo profundo como el que se representa en la figura 1.2, en el que la relación profundidad/diámetro pasa a ser mucho mayor.

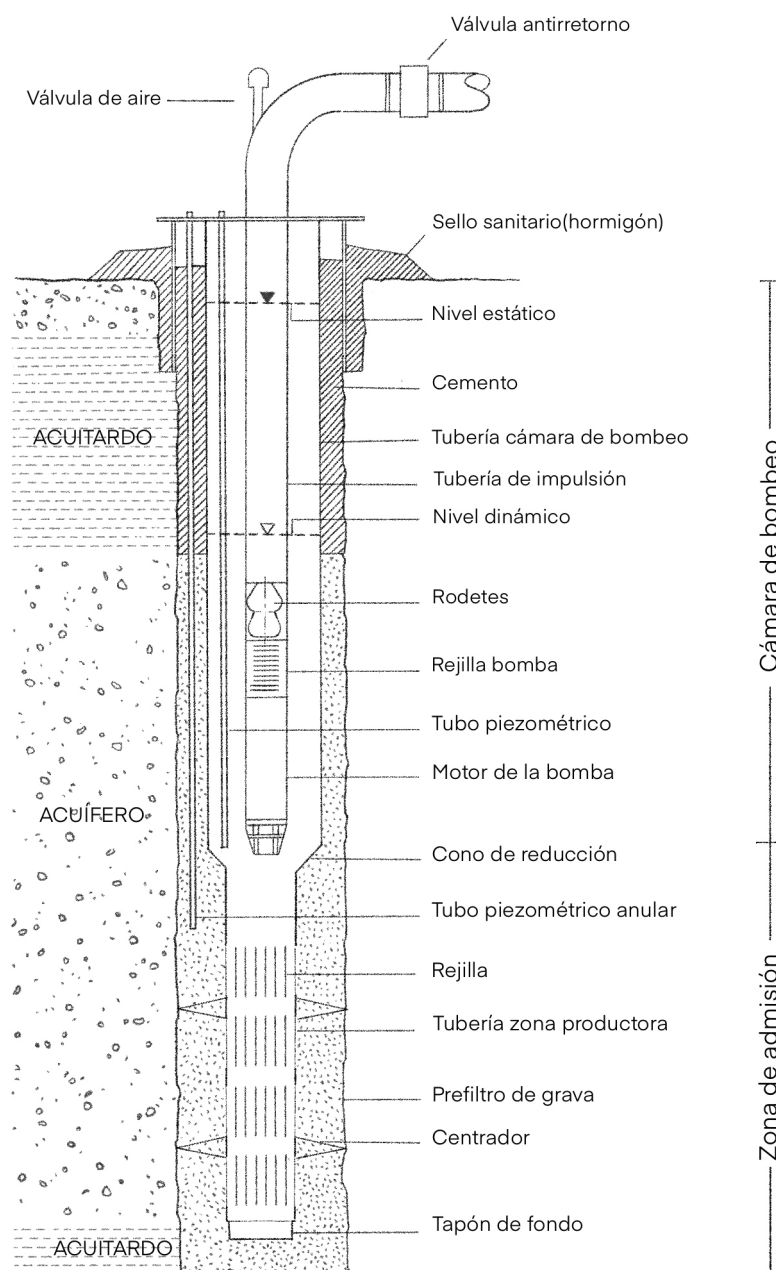


Figura 1.2. Componentes básicos de la instalación de un sondeo de explotación de agua subterránea.

La proliferación de este tipo de obras de captación contribuyó a mejorar el abastecimiento a las poblaciones, a aumentar el rendimiento agrícola de nuestros campos y el de nuestra industria. Sin embargo, este incremento del número de pozos no estuvo acompañado de unas medidas de control técnico-administrativo, ni de una normativa adaptada a los avances tecnológicos para la ejecución de este tipo de obras.

La realización de prácticas constructivas inadecuadas, el empleo de materiales de calidad deficiente y el diseño inapropiado de muchos de estos pozos (figura 1.3) han provocado y provocan serios problemas de contaminación de acuíferos, al poderse constituir estas perforaciones verticales en

auténticas vías de comunicación entre acuíferos contaminados y otros que no lo están (figura 1.4). Por otro lado, el abandono sin un correcto sellado de la captación de muchas de las perforaciones que han estado operativas y el de otras que, por resultar negativas también han sido abandonadas, han provocado algunos accidentes de final trágico.

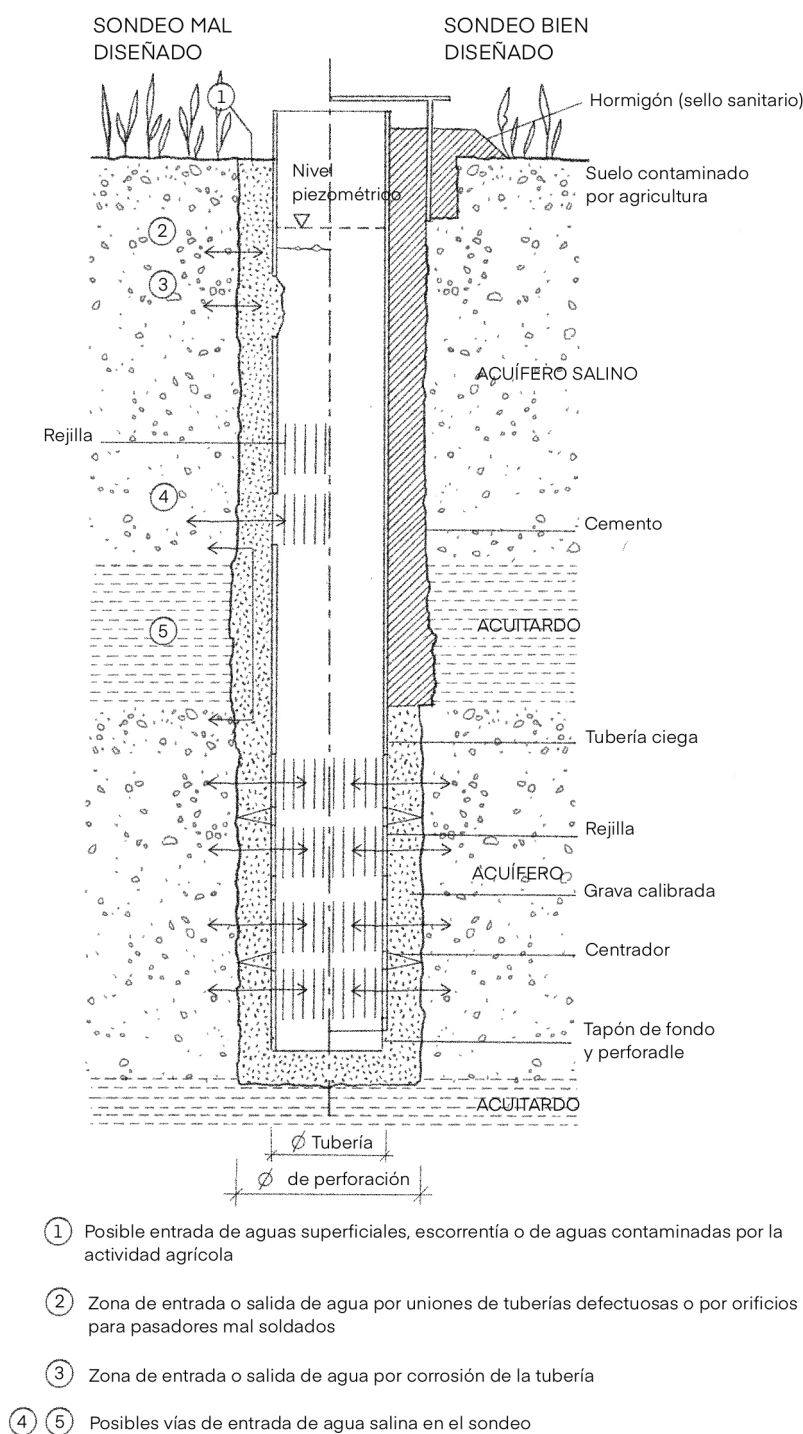


Figura 1.3. Posibles causas por las que un inadecuado diseño constructivo o ejecución de un sondeo puede provocar la entrada de agua de mala calidad en la captación o la comunicación de acuíferos con distinta calidad del agua.

En la figura 1.4 se muestran diferentes esquemas constructivos, señalando los niveles piezométricos de cada pozo en función de los tramos de rejilla instalados y se indica si existe flujo en el interior del pozo y su sentido. Si el acuífero carbonatado superior estuviese contaminado, el pozo 5 contaminaría el acuífero detrítico libre. Los pozos 6 y 7 conectan los dos acuíferos carbonáticos, permitiendo el flujo desde el acuífero carbonatado inferior al superior. El pozo 10 presentará agua salinizada al haber alcanzado el acuitardo profundo, formado por materiales evaporíticos. Lo mismo ocurre en el pozo 7 que además aporta agua salina, proveniente del acuitardo evaporítico, al acuífero carbonático superior.

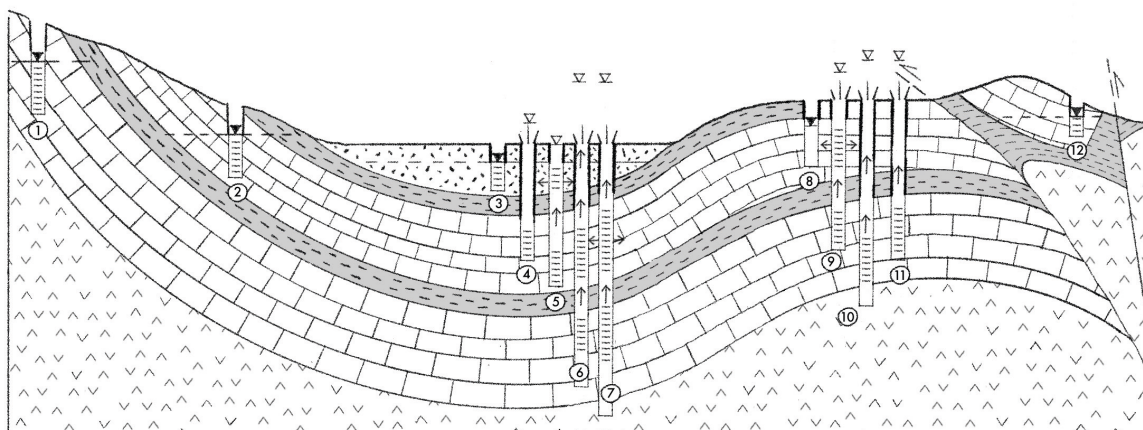


Figura 1.4. Esquema hidrogeológico en el que se muestran diferentes esquemas constructivos de pozos.

Esta guía tiene como objetivo ayudar a todas las partes que intervienen en la construcción de un sondeo (incluidas propiedad, dirección de obra, técnicos, empresas y operarios) a hacer que este tipo de obra cumpla con unos mínimos de calidad, con los que aumentar su durabilidad, su relación coste-eficiencia y evitar que los pozos constituyan una vía de contaminación de los acuíferos.

Esta guía, basada en la guía de la AIH-GE (2022), pretende aunar en un solo volumen una serie de estándares mínimos necesarios para construir un pozo o sondeo de captación de aguas subterráneas.

Muchos de los conceptos aquí recogidos ya están definidos en normativas autonómicas, en normativas específicas de las demarcaciones hidrográficas, o son conocidos por los constructores de sondeos. En consecuencia, algunos de los capítulos de esta guía no se desarrollarán exhaustivamente, sino que incorporan el contenido suficiente para saber cómo se debe realizar la obra y qué normativas o manuales se pueden consultar.

En esta guía se tratan distintos aspectos relativos a la construcción de pozos. Se describen, en los capítulos 2 y 3, aspectos relacionados con la planificación a desarrollar para llevar a cabo la construcción de un pozo y los contenidos mínimos que se deben exigir al estudio hidrogeológico previo, necesario para diseñar y poder construir una captación de agua subterránea. En el cuarto capítulo se dan una serie de recomendaciones para el diseño de un sondeo, en función del tipo de formación geológica a perforar. En el quinto capítulo se aborda la tramitación legal para la construcción de un pozo en España. Le siguen los contenidos mínimos que deben ser incluidos en la documentación del proyecto de este tipo de obra subterránea. El séptimo capítulo es el más extenso dado que se dan recomendaciones respecto a las distancias mínimas que se deben respetar entre el sondeo y posibles focos de contaminación, se indica cómo se debe realizar el control geológico e hidrogeológico durante la construcción de un sondeo, se tratan aspectos relativos al entubado, engravillado y cementación de los sondeos, a los ensayos de bombeo y a la protección sanitaria y la desinfección total del pozo una vez acabado. En el octavo capítulo se dan recomendaciones sobre cómo y

qué contenido debe tener el informe final de un pozo. Esta guía está acompañada con una serie de anexos. En el primero se presenta una recopilación de la normativa internacional relacionada con la construcción, el diseño, sellado y clausura de pozos. En el segundo anexo se realiza otra recopilación de la cualificación requerida a las empresas y al personal técnico dedicado a la construcción de pozos de captación de aguas subterráneas. Le siguen dos anexos más, con estadillos para la realización de ensayos de bombeo y un modelo de ficha tipo de inventario de puntos de agua.

2. Planificación para la realización de un pozo de captación de agua subterránea

2.1. Aspectos generales

La planificación de la ejecución de un sondeo de captación de aguas subterráneas implica la consideración de un amplio conjunto de cuestiones técnicas y legales que deben ser conocidas por todo aquel que pretenda acometer este tipo de obra.

En la figura 2.1 se representa un esquema con las distintas etapas a tener en cuenta, desde la realización del informe hidrogeológico preliminar hasta su abandono y clausura, tras finalizar su vida útil.

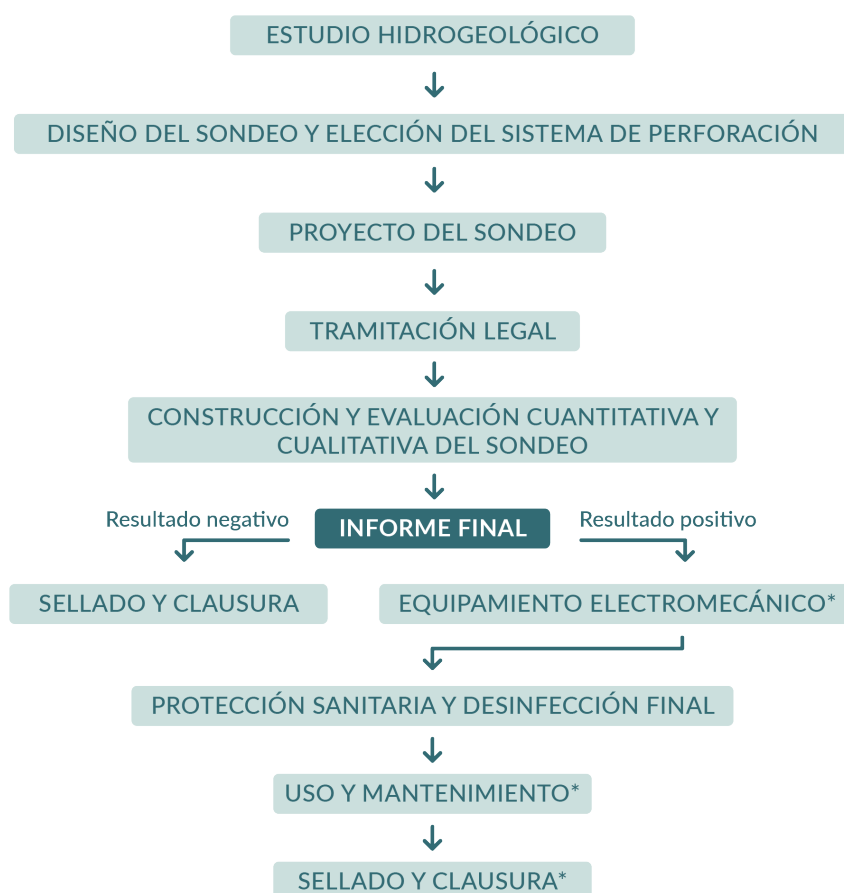


Figura 2.1. Etapas a realizar para la ejecución, puesta en marcha y abandono de un sondeo. (*) no se considera en esta guía.

2.2. Estudio hidrogeológico

Los sondeos diseñados en base a un estudio hidrogeológico suelen ser captaciones más eficientes y más duraderas que las que se hacen sin información previa.

En el estudio hidrogeológico que se hace para la construcción de un sondeo (ver capítulo 3) se evalúa el emplazamiento donde se va a realizar la perforación, la litología y la consolidación de los materiales a perforar, la profundidad y el espesor de los materiales, la profundidad del nivel piezométrico, la calidad del agua de las formaciones geológicas y masas de agua del entorno y los parámetros hidráulicos de los materiales, entre otros muchos factores. Toda esta información permite seleccionar el sistema de perforación más adecuado y hacer un correcto diseño del sondeo.

2.3. Diseño de la captación

El diseño final del pozo de captación de aguas subterráneas debe obedecer a múltiples factores que deben ser conocidos gracias, fundamentalmente, al estudio hidrogeológico previo. Con todo, son el caudal de explotación, las litologías a perforar y las profundidades del sondeo y del nivel piezométrico los principales factores a tener en cuenta.

La figura 1.2 representa un esquema constructivo típico de un sondeo de captación de agua subterránea en un acuífero detrítico confinado, al que se superpone, en este caso, un acuífero libre y de naturaleza detrítica. Por otra parte, la figura 1.3 muestra cómo, en un mismo emplazamiento, un diseño inadecuado de un sondeo o una mala praxis en su ejecución pueden dar lugar a que esta captación no pueda extraer un agua de buena calidad.

En el capítulo 4 de esta guía se presentan los diseños más frecuentes de sondeos para la captación de aguas subterráneas en acuíferos en rocas duras, en acuíferos consolidados y en formaciones acuíferas no consolidadas. Asimismo, se indican los sistemas de perforación más adecuados para cada diseño constructivo.

2.4. Elaboración del proyecto constructivo

La realización del proyecto constructivo de un pozo para la captación de aguas subterráneas es un requisito legal, que consiste en un documento detallado y conciso en el que se describen todas las especificaciones para la realización de la captación, organización de medios, personas, materiales y métodos constructivos. Todo proyecto tendrá asignados unos objetivos, unas especificaciones técnicas a cumplir, un plazo de ejecución y un presupuesto que defina todas y cada una de las unidades a ejecutar. Estas son las partes fundamentales que definen el documento definitivo.

El éxito del proyecto se basa en la calidad del estudio hidrogeológico previo, dado que de ahí se tomarán los datos esenciales para la selección del emplazamiento, del sistema de perforación y para el diseño constructivo del pozo.

En el capítulo 6 de esta guía se describen todos los documentos técnicos, los planos y los contenidos que debe incluir el proyecto para la realización de un pozo de captación de aguas subterráneas.

2.5. Gestión de permisos y tramitación de la obra

La construcción y puesta en marcha de un pozo está regulada y requiere cumplir una serie de requisitos legales. Son necesarios permisos de carácter público y privado, la realización del proyecto constructivo, asignar un director facultativo de la obra y presentar la documentación requerida por distintos organismos públicos. Todo el proceso administrativo a seguir se describe en el capítulo 5 de esta guía, donde además se exponen varios ejemplos de tramitación en distintas comunidades autónomas.

2.6. Ejecución de la obra

La construcción comienza con la preparación de los accesos y el acondicionamiento del emplazamiento donde se ejecutará la obra. Seguidamente se realiza la fase de perforación, que requiere de la testificación geológica y de alguna testificación geofísica durante su ejecución y sobre todo a su finalización. Durante esta fase también se puede proceder a la realización de pruebas de bombeo o ensayos de permeabilidad y al muestreo del agua de las formaciones perforadas. Una vez realizada la fase de perforación, los especialistas en hidrogeología encargados de la obra deciden si el pozo debe ser acondicionado o si por el contrario se decide darlo por negativo, al no haberse conseguido los objetivos para los que se planteó o al haberse ejecutado la perforación indebidamente. En caso de resultar negativo debe procederse a su sellado, siguiendo los procedimientos recomendados en la Guía técnica para la clausura y sellado de captaciones de aguas subterráneas (MITECO, 2025a). Si se prevé que el sondeo sea positivo se continúa con la fase de acondicionamiento, mediante la cual la perforación se transforma en un sondeo de captación de agua subterránea. En esta fase se entuba el sondeo, se coloca el macizo o prefiltro de grava y se hacen las cementaciones, en caso de ser necesario. Finaliza la fase de acondicionamiento con la realización de una cementación de la cabeza del sondeo en sus primeros metros de profundidad, de manera que se rellena con lechada de cemento el anular comprendido entre el terreno y la entubación más externa del sondeo. Seguidamente se procede a la limpieza del sondeo y a su desarrollo, si se requiere. Con las operaciones de desarrollo se persigue aumentar la permeabilidad en el entorno de la captación. Se utilizan medios mecánicos (bombeos alternos, sobrebombeo, inyección de agua a presión, aire comprimido, pistones), químicos (ácidos, polifosfatos, nieve carbónica) o ambos. Finalmente, se realiza una desinfección y se cierra el cabezal del sondeo hasta la instalación definitiva del equipo de bombeo.

2.7. Ensayo de bombeo y evaluación del caudal y de la calidad del agua

Terminado el sondeo se debe proceder a evaluar cuantitativa y cualitativamente la captación. Para ello se realizan los ensayos de bombeo, con los que se determinan las características hidrodinámicas del acuífero captado, el caudal de explotación más aconsejable, la posición y la potencia de la bomba necesaria para explotar ese caudal y se muestrea el agua explotada. El posterior análisis del agua permite conocer si cumple con los requisitos de calidad necesarios para el uso que se le va a dar.

Si se decide que el sondeo no debe ser puesto en servicio por no alcanzar el caudal de bombeo necesario o por una deficiente calidad del agua, se debe proceder a su sellado.

2.8. Informe final de la ejecución del sondeo

Independientemente del resultado positivo o negativo del pozo, siempre se debe realizar un informe final de la obra, donde se recojan los trabajos realizados y sus resultados. En este informe se incluirán todos los resultados e incidencias de la obra, siendo muy importante indicar las modificaciones constructivas respecto al proyecto inicial. Si el sondeo resulta negativo, en el informe se debe especificar detalladamente el sistema de sellado y clausura y el estado final del pozo, adjuntando en el informe las correspondientes fotografías, así como cualquier observación que se crea oportuna.

El informe final constituye un documento de consulta fundamental para la instalación y puesta en marcha del pozo y para las posteriores operaciones de mantenimiento, por lo que debe hacerse con especial detalle. Los contenidos mínimos que debe incluir el informe final de un pozo de captación de agua subterránea se describen en el capítulo 8 de esta guía.

2.9. Equipamiento electromecánico

Los resultados de las fases anteriores deben permitir el correcto dimensionado de las instalaciones para la extracción de agua. La importancia de este trabajo es esencial, dado que tiene una repercusión en el rendimiento de los equipos y en el coste de la extracción del agua.

Se debe partir de un caudal de explotación acorde con el caudal óptimo deducido del ensayo de bombeo, la demanda de agua existente, la altura manométrica de elevación, la potencia y tipología de la bomba, la tubería de impulsión y los elementos auxiliares (codos, válvulas, etc.), la procedencia de la corriente eléctrica, la línea de alimentación (potencia a instalar, intensidad de corriente y caída de tensión), y el cuadro de protección y maniobra.

Todos los pozos de explotación de agua subterránea deben contar con dispositivos de medida del nivel piezométrico. Por ello, junto con la tubería de impulsión debe colocarse una tubería piezométrica de tal forma que permita realizar mediciones puntuales de la profundidad del agua, mediante la introducción de un hidronivel o un registro continuo mediante sensores automáticos de medida del nivel.

2.10. Protección sanitaria y desinfección final

Todos los pozos deben tener una protección sanitaria, o un cierre sanitario, que impida la contaminación directa del agua subterránea desde la superficie hasta el interior del pozo.

El cierre sanitario de un pozo debe contener tres elementos fundamentales:

1. El cierre de la cabeza de la entubación y de la salida de la tubería de impulsión.
2. El sello sanitario.
3. La caseta de protección.

En el capítulo 7.7. se describen diferentes procedimientos para realizar la correcta protección sanitaria de este tipo de captaciones.

Una vez terminada la instalación electromecánica del sondeo y su cierre sanitario es recomendable hacer una desinfección final del pozo, especialmente si este va a ser explotado para abastecimiento.

2.11. Sellado y clausura

Los sondeos en los que definitivamente se descarta su uso por su mala ejecución, por no conseguir el objetivo hidrogeológico esperado, por falta de caudal o por mala calidad del agua, deben ser sellados y clausurados de forma inmediata a su perforación.

De igual forma, los pozos que han estado en explotación y que no van a volver a ser utilizados por abandono de actividad, deterioro progresivo de la calidad, descenso excesivo del nivel, agotamiento del acuífero o deterioro de la construcción por corrosión, roturas en la tubería de revestimiento, efectos mecánicos (golpes de ariete), u otros, también deben ser sellados y clausurados. En la Guía técnica para la clausura y sellado de captaciones de aguas subterráneas (MITECO, 2025a) se proponen distintos procedimientos de clausura de pozos.

3. Contenidos y resultados del estudio hidrogeológico

3.1. ¿Qué debe contener el estudio hidrogeológico previo a un sondeo?

Un estudio hidrogeológico para la ejecución de un pozo de captación de agua subterránea debe realizarse con el objetivo de conocer los siguientes aspectos:

- Litologías y formaciones acuíferas a perforar. Es esencial conocer el grado de consolidación y la litología de todos los materiales que se van a perforar, dado que esta cuestión condiciona el sistema de perforación a emplear. Asimismo, debe indicar si los acuíferos a perforar son acuíferos libres o confinados y un valor lo más aproximado posible de su espesor.
- Niveles piezométricos regionales. No solo interesa saber el nivel piezométrico del acuífero objetivo. Los niveles del resto de acuíferos y de los acuitardos atravesados durante la perforación del sondeo aportan información esencial para su buen diseño constructivo.
- Inventario de los puntos de agua.
- Características hidrogeológicas de los materiales acuíferos. Fundamentalmente, transmisividad, permeabilidad, coeficiente de almacenamiento y porosidad.
- Masa de agua subterránea a la que pertenece, o si se trata de un acuífero local.
- Límites del acuífero a captar, definición geométrica, identificación de la zona de recarga y de las zonas de contorno (límites negativos, como contacto con materiales de baja permeabilidad, y límites positivos, como ríos, lagos y el mar).
- Recursos medios renovables y reservas del acuífero o acuíferos a explotar.
- Calidad del agua de las formaciones geológicas atravesadas. Además de conocer la calidad del agua subterránea del acuífero objetivo, en relación con el uso al que se pretenda destinar, se requiere caracterizar la agresividad y la incrustabilidad del agua de las formaciones atravesadas para la correcta selección del material para la entubación del pozo. Asimismo, en acuíferos pequeños que están en contacto con otras masas de agua, es muy recomendable conocer su calidad.

Además de esta información puramente hidrogeológica, en el informe también se deben considerar los siguientes aspectos:

- a) Cálculo del volumen de agua anual que se pretende explotar y del caudal máximo de explotación.
- b) Inventario y localización de potenciales focos de contaminación y la infraestructura eléctrica e hidráulica potencialmente utilizable, en el entorno próximo a los emplazamientos propuestos para la ejecución del sondeo.
- c) Clasificación y tipo de protección ambiental de los terrenos donde se realizará el sondeo.

3.2. ¿Qué resultados se deben conseguir con el estudio hidrogeológico?

Una vez obtenida toda la información necesaria, el estudio hidrogeológico previo a la ejecución de un sondeo de captación de agua subterránea debe contener la siguiente información:

1. Propuesta de ubicación (coordenadas X, Y, cota topográfica) y accesos de los posibles emplazamientos donde se va a realizar la perforación o las perforaciones (es importante comprobar previamente "in situ" los accesos y las ubicaciones).

2. Profundidad recomendada y diámetro de perforación previsto, columna litológica prevista, destacando los niveles productivos a explotar y aquellos en los que sea necesario su aislamiento, y grado de consolidación de los materiales.
3. Profundidad prevista del nivel piezométrico, estimación de la productividad hidráulica de la captación y análisis de la garantía del acuífero a explotar, en función de los recursos a extraer por la captación.
4. Características físico-químicas del agua.
5. Masa de agua subterránea o acuífero local donde se ubica.
6. Sistema de perforación y recomendaciones sobre el diseño constructivo de la captación (realización de balsas de decantación, zanjas de drenaje, zonas de acopio de materiales, detritus y ripios de perforación, y zonas para evacuar el agua, necesarias para la realización de los ensayos de bombeo, etc.).

4. Recomendaciones para el diseño de sondeos de captación de agua subterránea

4.1. Introducción

El diseño de un sondeo de captación de aguas subterráneas depende del caudal que se pretende explotar, de los factores hidrogeológicos y socio-económicos, del tipo de alimentación del equipo de impulsión, de la logística de las operaciones de suministro de componentes y mantenimiento, e incluso de aspectos culturales.

A pesar de todo lo anteriormente expuesto, el éxito en el diseño de una captación de agua subterránea está íntimamente relacionado con la cantidad de información, especialmente la hidrogeológica, que se ha podido recopilar, por eso no hay que escatimar esfuerzos en los estudios previos.

En nuestro país existen profesionales y empresas dedicadas a la construcción de captaciones de agua, a la instalación electromecánica de equipos de bombeo y a su mantenimiento, con una probada solvencia y experiencia, que permiten acometer y poner en marcha sondeos de captación de aguas subterráneas en cualquier tipo de acuífero y a profundidades que en ocasiones han superado el millar de metros. Sin embargo, existen multitud de situaciones en las que no es posible ejecutar un sondeo con el método de perforación más adecuado. Es el caso de perforaciones que se deben realizar dentro de viviendas, en sótanos, instalaciones industriales o en lugares de difícil acceso.

En este capítulo se hacen una serie de recomendaciones para el diseño de sondeos de captación de aguas subterráneas en distintos tipos de materiales geológicos, atendiendo fundamentalmente al grado de consolidación de los materiales a perforar. Antes de presentar los diferentes esquemas constructivos de sondeos se presenta un listado de aspectos que deben conocerse para plantear el diseño del sondeo y se explica cómo calcular el diámetro de la cámara de bombeo.

4.2. Aspectos a considerar antes del diseño de un sondeo

Se presenta a continuación un listado de cuestiones que deben ser consideradas antes de iniciar el diseño constructivo de un pozo de captación de aguas subterráneas. La revisión completa de este listado, que los anglosajones denominan "checklist" (lista de comprobación), es siempre de gran ayuda dado que es fácil pasar por alto algunos aspectos que deben ser incorporados en el planteamiento inicial del diseño de la perforación.

En esta “checklist”, inspirada en la realizada por Misstear et al. (2017), se contempla en primer lugar la información hidrogeológica necesaria para diseñar el sondeo. También están incluidos, y en este orden, otros aspectos fundamentales del diseño, constructivos, de protocolo de muestreo, de método de perforación y otros relacionados con los posibles métodos de desarrollo.

Checklist		☒
Aspectos hidrogeológicos		
Tipo de acuífero y litología		☐
Profundidad del nivel piezométrico		☐
Tipo de acuífero (libre, confinado, semiconfinado)		☐
Parámetros hidráulicos		☐
Profundidad y espesor del acuífero		☐
Condiciones de contorno del acuífero (límites positivos/negativos, zonas de recarga...)		☐
Calidad del agua subterránea (uso, contaminación, incrustabilidad/corrosividad)		☐
Parámetros de diseño generales		
Objetivo de la captación: investigación/explotación		☐
Máximo caudal de explotación y régimen de explotación (abast., regadío, industrial)		☐
Tipo y diámetro de la bomba		☐
Profundidad del nivel dinámico		☐
Ubicación del sondeo (accesos, focos de contaminación, líneas eléctricas, conducciones, zonas inundables...)		☐
Litología, grado de consolidación de los materiales y tipo de acuíferos		☐
Esquema constructivo		
Diámetro y profundidad de la cámara de bombeo		☐
Diámetro y profundidad de la zona de admisión		☐
Entubado (total o parcial, solidario o no con la cámara de bombeo)		☐
Sondeo con rejilla o «open hole»		☐
¿Macizo de grava?		☐
¿Cementaciones?		☐
¿Desarrollos?		☐
Materiales constructivos		
Tipo, composición y espesor de la tubería de revestimiento		☐
Tipo, composición, espesor, % de área hueca y luz de malla de la rejilla		☐
Longitud de rejilla		☐
Macizo o prefiltro de grava (granulometría y composición)		☐
Diseño adecuado de la zona de admisión		☐
Tipo de cemento a emplear		☐

Checklist ☒	
Protocolo de muestreo	
Cadencia de muestreo litológico según profundidad	☐
Metodología de muestreo y almacenamiento de muestras	☐
Cadencia de muestreo de testigos	☐
Métodos de obtención de los testigos	☐
Muestreo de agua de producción. Cadencia y procedimiento	☐
Medidas de parámetros físico-químicos del agua de producción	☐
Métodos de perforación	
¿Materiales consolidados, inconsolidados o ambos?	☐
Profundidades (profundidad máxima) y diámetros	☐
Tiempo de ejecución. ¿Es un pozo de emergencia?	☐
Percusión, rotopercusión, rotación, testigo continuo, helicoidal, operaciones combinadas	☐
¿Fluidos de perforación?	☐
¿Plataforma de perforación?	☐
¿Hay que tomar muestras inalteradas?	☐
Métodos de desarrollo	
¿El diseño del pozo permite tratamientos de desarrollo con pozo cerrado?	☐
¿Los materiales constructivos son adecuados para operaciones de acidificación, jetting, pistoneo...?	☐

Tabla 4.1. "Checklist" (lista de comprobación) de algunos aspectos que deben ser incorporados en el planteamiento inicial del diseño de la perforación. Inspirada en la realizada por Misstear et al. (2017).

4.3. Diámetros

Independientemente del diseño constructivo del pozo, el diámetro de la cámara de bombeo, zona del sondeo comprendida entre la superficie del terreno y donde queda o puede quedar instalada la bomba sumergible (figura 4.1), se calcula de igual modo en todos los casos. Por eso, en el siguiente epígrafe se explica cómo determinar el diámetro de perforación necesario para poder construir una cámara de bombeo acorde al caudal que se pretende extraer.

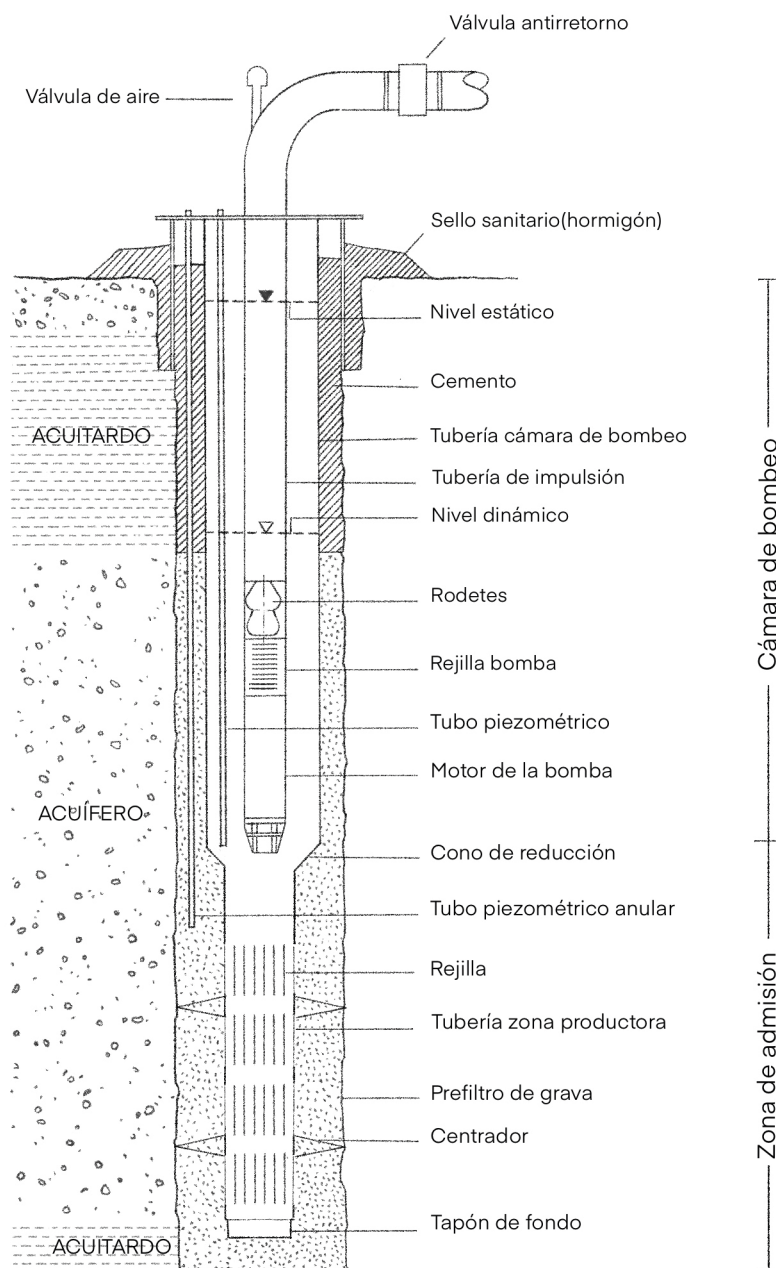


Figura 4.1. Cámara de bombeo y zona de admisión de un sondeo de captación de aguas subterráneas.

El diámetro de perforación de un pozo realizado para bombear un determinado caudal está condicionado por el diámetro de la bomba que debe ser colocada en su interior. A mayor caudal de explotación, mayor es el diámetro de la bomba, mayor el diámetro de la cámara de bombeo y, por tanto, mayor deberá ser el diámetro de la perforación.

La práctica totalidad de los pozos de explotación que se construyen en la actualidad utilizan bombas electro-sumergibles debido a su óptima relación coste/eficiencia, por esta razón todos los diseños

de sondeos que se presentan en esta guía se hacen considerando que serán equipados con este tipo de bombas.

Para conocer el diámetro de la bomba se debe conocer el caudal de explotación y la altura manométrica a la que hay que elevar el agua. Con estos dos datos se pueden consultar los catálogos de bombas que ofrecen las distintas marcas comerciales y conocer así el diámetro de la bomba que se necesita. En la figura 4.2 se presentan dos gráficos de la relación del caudal con la altura manométrica, para bombas de flujo semiaxial y radial. En estos gráficos se pueden consultar los diámetros para los diferentes modelos de bombas sumergibles comerciales.

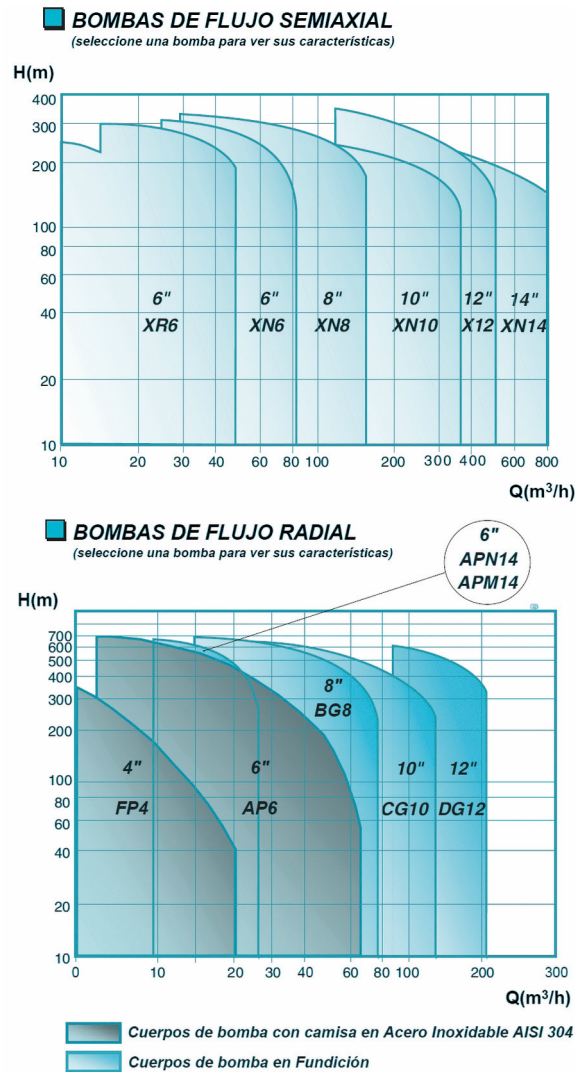


Figura 4.2. Diámetros de electrobombas sumergibles de flujo semiaxial y radial en función del caudal extraíble y la altura manométrica de elevación.
Fuente: Catálogo de bombas Aturia.

El diámetro de la cámara de bombeo debe permitir el descenso y el ascenso del equipo de impulsión sin ninguna dificultad. A lo largo de la vida útil de un pozo, la bomba deberá ser extraída en distintas ocasiones por averías, operaciones de mantenimiento o simplemente para su sustitución. Además, el diámetro de la cámara de bombeo debe ser suficiente para que no se creen unas pérdidas de carga excesivas al penetrar el agua en la bomba. Se necesitan velocidades en el entorno de la bomba com-

prendidas entre 0,5 y 4 m/s. Velocidades de entrada mayores generan grandes pérdidas de carga y velocidades menores impiden la refrigeración de la bomba.

A modo de ejemplo, en la tabla 4.2, se presentan el diámetro óptimo de revestimiento y el diámetro mínimo que debe tener la tubería de la cámara de bombeo con bombas de distinto diámetro y de distinto caudal de explotación. Los datos de caudal de las bombas corresponden a alturas manométricas de 50 y de 200 m.c.a., respectivamente, extraídos de la figura 4.2.

Carcasa bomba	H = 50 m.c.a		H = 200 m.c.a.		Cámara de bombeo	
Pulgadas/mm	Q mín.	Q máx.	Q mín.	Q máx.	Diámetro óptimo	Diámetro mínimo
	l/s	l/s	l/s	l/s	(mm)	(mm)
4/101.6	1	5	1	2	150 DI	125 DI
6/152.4	5	22	2	19	250 DI	200 DI
8/203.2	22	46	19	40	300 DI	250 DI
10/254	46	103	40	58	350 DE	300 DE
12/304.8	103	140	58	120	400 DE	350 DE
14/355.6	140	215	120	135	500 DE	400 DE

Tabla 4.2. Caudales de bombeo, diámetros mínimo y óptimo de la cámara de bombeo para bombas de distinto diámetro y alturas manométricas de elevación de 50 y 200 m.c.a.
(Q = Caudal, H = Altura manométrica de elevación, DI = Diámetro interno, DE = Diámetro externo)

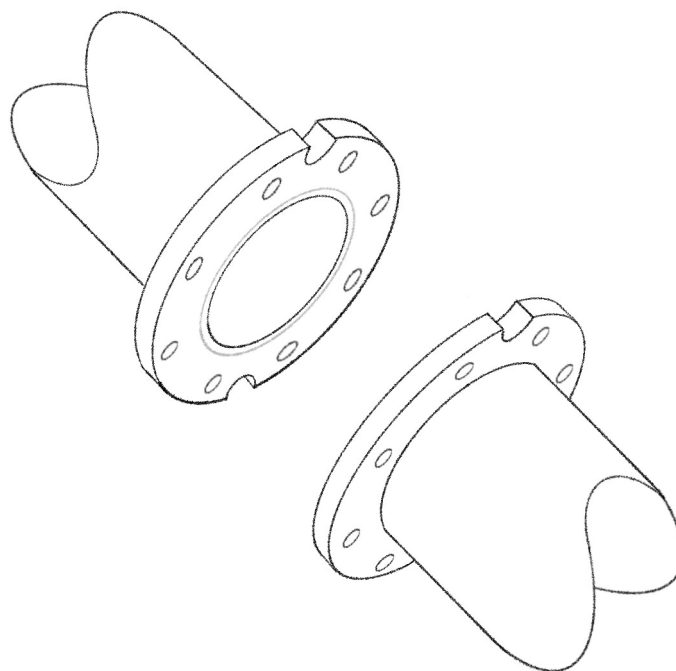


Figura 4.3. Detalle de las bridas o pletinas de unión de una tubería de impulsión con dos muescas a 180° necesarias para el cableado y la tubería que se utiliza para medir el nivel piezométrico del pozo o sondeo.

Es conveniente tener en cuenta que al instalar bombas de reducido diámetro (menores de 6") estas pueden tener menos diámetro que las bridas o pletinas de unión de la tubería de impulsión (figura 4.3), por lo que habrá que consultar los catálogos.

Diámetro de perforación				Diámetro de entubado				
Percusión con cable	Rotación directa o inversa Rotoper. inversa		Rotoper. directa	Tubos roscados			Tubos soldados	
				Metálicos			PVC	Metálicos
				Dia. Ext.	Dia. API	Diam. Ext. Manguitos	Diam. Ext. (2)	Diam. Ext. (3)
mm	Pul.	mm	Pul.	Pul.	mm	mm	mm	mm
600 a 650	24"	609,6	(1)	20"	508	533,4	500	450-500
500 a 550	20"	508	(1)	16" a 18,62"	406 a 473	432 a 498	400	400
400 a 450	17,5"	444,5	17,5"	13,39"	340	365	315-330	300-350
300 a 350	12,25"	331,1	12,25"	9,62"	244,5	270	250	250
200 a 250	8,5"	215,9	8,5"	7"	178	194,5	180	180
****	6,25"	158,7	6,25"	5"	127	141	110-140	100-140
****	****	****	4"	3"	76	****	****	****

Tabla 4.3. Relación entre diámetros de perforación y diámetros de entubación de los principales métodos de perforación (Modificada de Bayó, 1996).

Rotoper., rotoperación; Diám., diámetro.

(1) Diámetros no comerciales de este sistema, aunque existen algunas empresas que perforan en rotoperación directa en 20", hasta que tienen problemas de sobrepresión por la columna de agua en el interior del pozo.

(2) Espesores de la pared del tubo de 3 a 18 mm.

(3) Espesores de la pared del tubo de 6 a 8 mm.

Conocido el diámetro de la cámara de bombeo se establece el diámetro de perforación. En la tabla 4.3 se presentan, por filas, los diámetros de perforación (según el método seleccionado), que se requieren para los diámetros comerciales más usuales de tuberías unidas mediante soldadura o mediante rosca. Por presentar un ejemplo, un pozo en el que se requiere elevar un caudal de 40 l/s a una altura de 50 m, necesita una cámara de bombeo entubada en 300 mm (tabla 4.2). Si la tubería es metálica y unida mediante soldadura y el sondeo se perfora a percusión, este deberá perforarse con un diámetro de 400 a 450 mm. Si ese mismo pozo se construye a rotación inversa necesitará un diámetro de perforación de 444,5 mm. Si se requiere colocar macizo o prefiltro de grava o hacer alguna cementación entre la tubería de la cámara de bombeo y la pared del sondeo, se debe subir un peldaño en la columna de los diámetros de perforación por cada operación (tabla 4.3). En nuestro ejemplo, si se requiere colocar un macizo de grava y se perfora a percusión, se tendrá que trabajar con un trépano de 500 mm y si se hace a rotación inversa con un tallante de 508 mm.

4.4. Diseño de sondeos en rocas cristalinas o rocas duras

Dentro de este grupo de rocas, conocidas en términos hidrogeológicos como rocas duras, se incluyen las rocas ígneas, las rocas metamórficas y algunas rocas sedimentarias fuertemente cementadas como las areniscas.

Los afloramientos de este tipo de rocas suelen presentar una zona de alteración que en ocasiones da lugar a la existencia de delgados acuíferos libres superficiales, que si están bien alimentados pueden

permitir su explotación. Por otro lado, la presencia de fracturas y diaclasas les confiere su principal característica hidrogeológica que es su permeabilidad por fracturación.

El método más adecuado para perforar este tipo de rocas es el de rotopercusión. El más frecuente es, con mucho, el de rotopercusión directa, con martillo de fondo. No obstante, también se suele perforar con máquinas que combinan la rotopercusión y la rotación inversa para perforar pozos profundos y acuíferos en los que la presencia de algunas fracturas muy abiertas impide la recuperación del detritus cuando se perfora en rotopercusión directa.

La profundidad de los sondeos que se realizan en este tipo de acuíferos no suele superar los 100 m. En Singhal y Gupta (2010) se presentan numerosos casos de estudio con los que se comprueba cómo se reduce la permeabilidad de estos acuíferos con la profundidad. Con todo, el adecuado análisis de la información del inventario de pozos de la zona puede permitir tener una idea de la profundidad máxima recomendable.

Los caudales medios de explotación que se consiguen en los pozos perforados en este tipo de rocas suelen ser inferiores a 1 l/s y en contadas ocasiones se superan 3 l/s. Estos datos son esenciales para su diseño. Para explotar estos caudales es suficiente con una bomba electro-sumergible de 4" de diámetro (101,6 mm), como se puede comprobar en la tabla 4.2. Por lo tanto, las cámaras de bombeo entubadas con diámetros de 150 a 200 mm son suficientes.

Existen tres esquemas constructivos recomendados. Los dos primeros presentan una configuración en "open-hole" (agujero abierto en inglés) al quedar la zona de admisión sin entubar, mientras que el tercer ejemplo es para el caso particular de acuíferos multicapa con areniscas muy cementadas.

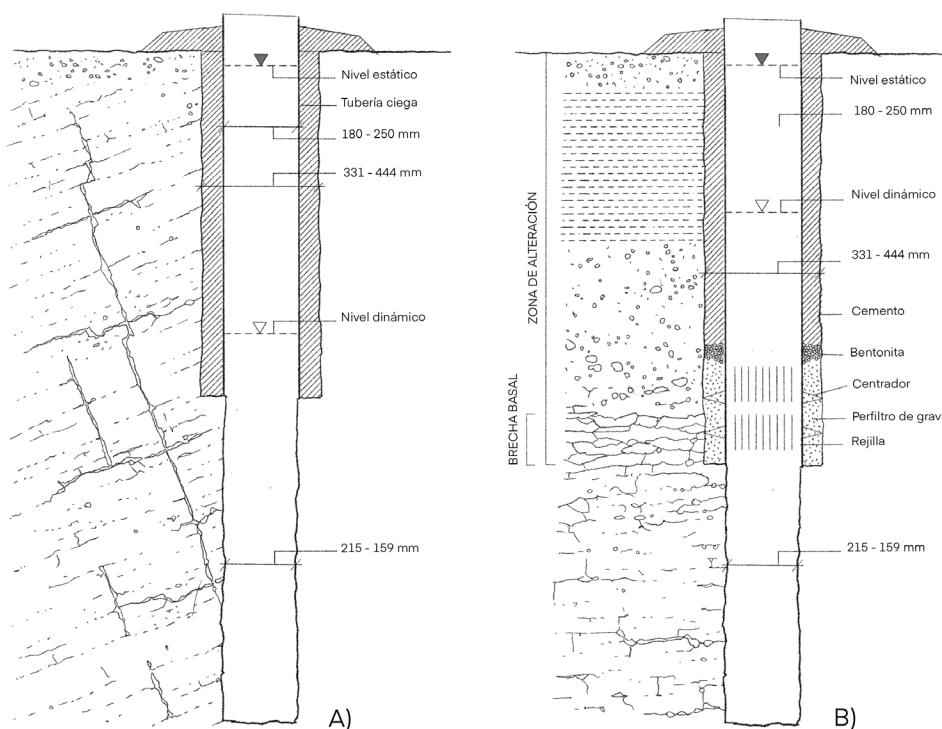


Figura 4.4. Esquemas constructivos de sondeo en rocas duras.

En la figura 4.4 A se ha representado el esquema constructivo de un sondeo construido en un afloramiento de rocas duras donde no hay zona de alteración. La cámara de bombeo se cementa para

evitar la contaminación directa del pozo por el anular y para proteger la tubería, mientras que la zona de admisión se deja sin entubar y con un diámetro mínimo de 150 mm, para permitir, en caso de ser necesario, la introducción de equipos de desarrollo.

En el ejemplo representado en la figura 4.4 B se presenta el esquema constructivo recomendado para sondeos que se perforan en la zona de alteración de un afloramiento de rocas duras. En este caso la cámara de bombeo es solidaria con la zona de admisión, con la que se capta la zona de transición entre la zona alterada y la roca madre, que suele ser el tramo más productivo en este tipo de acuíferos. Seguidamente, cuando se perfora la roca dura consolidada, el sondeo queda sin entubar al igual que en el caso anterior.

Por último, cuando se pretende perforar una alternancia de areniscas de naturaleza silíceas muy cementadas, se recomienda instalar un macizo o prefiltro de grava para evitar la entrada de finos en la bomba. En este caso (figura 4.5), el sondeo se entuba en su totalidad con un solo diámetro, enfrentando los tramos filtrantes con los tramos productivos y cementando la cabeza del sondeo para evitar su contaminación. Al colocar el macizo de gravas se requiere utilizar centradores, siendo recomendable dejar la tubería suspendida y poner un tapón de fondo perforable.

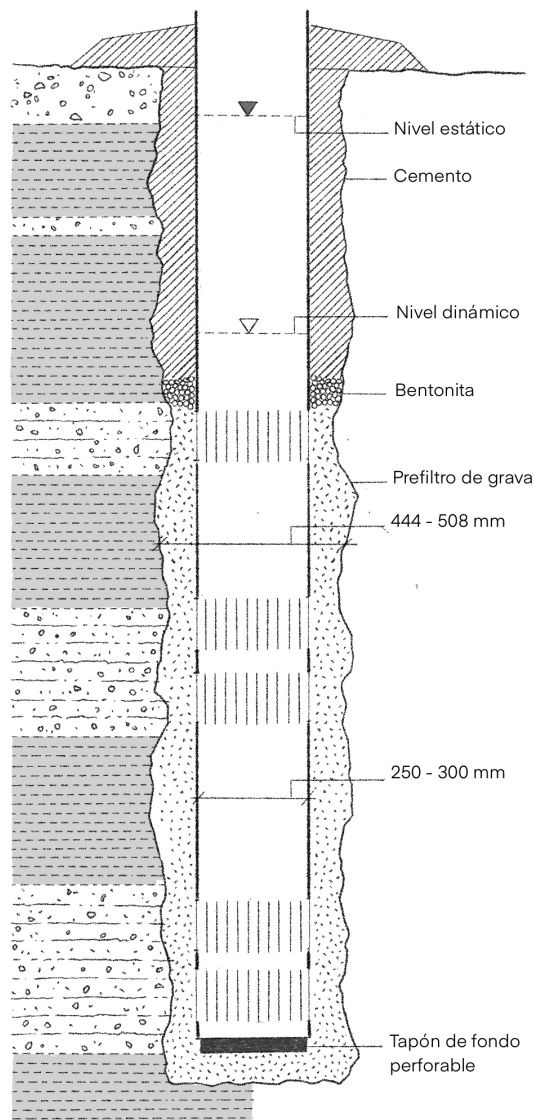


Figura 4.5. Esquema constructivo de un sondeo que perfora un acuífero multicapa compuesto por una alternancia de areniscas silíceas muy cementadas.

4.5. Diseño de sondeos en rocas consolidadas

El diseño de los pozos en rocas consolidadas es muy parecido al de las rocas duras, la diferencia consiste en que en el caso de las rocas consolidadas se suelen requerir mayores diámetros y profundidades de perforación.

Los principales acuíferos consolidados son los acuíferos carbonáticos, formados por calizas y dolomías. Estas formaciones geológicas pueden proporcionar altas productividades, en especial cuando los sondeos perforan fracturas o conductos conectados con la red principal de conductos kársticos del sistema.

Si se requieren caudales importantes se pueden construir pozos con cámaras de bombeo de 500 mm de diámetro en las que se instalan bombas capaces de suministrar más de 100 l/s.

En España no es muy frecuente, pero en el Reino Unido y en Estados Unidos algunos pozos de abastecimiento colocan los equipos de impulsión desplazados respecto al centro del sondeo para poder instalar un tubo de by-pass de 100 mm de diámetro, paralelo a la tubería de impulsión. Este tubo permite poder hacer registros videográficos y comprobar si es necesario hacer tratamientos químicos para la desincrustación de las rejillas, sin la necesidad de extraer la bomba.

Los métodos de perforación empleados pueden ser variados. Se requieren métodos de perforación adecuados, debido a las pérdidas del fluido de perforación o de la recuperación de detritus cuando se atraviesan fracturas abiertas o conductos kársticos. El método más utilizado en nuestro país para construir este tipo de pozos es el de percusión. Con todo, las sondas que permiten perforar a rotación y a rotopercusión inversa han conseguido alcanzar profundidades superiores a los 1000 m, con columnas de agua de centenares de metros (Martos-Rosillo et al., 2004). Cuando se trabaja con este tipo de equipos es conveniente hacer un sondeo piloto, perforado con un tallante que disponga de un diámetro de 10" o inferior y realizar una prueba de bombeo y recuperación con el sistema de "air-lift" para determinar la productividad hidráulica del pozo y para muestrear el agua de la formación acuífera. Si las pruebas resultan positivas, se procede a la reperforación del pozo con mayor diámetro, aprovechando el taladro del sondeo piloto (Martos-Rosillo et al., 2006, 2007).

Deben ser destacados los numerosos pozos realizados en las planas litorales del Levante español, donde para atravesar y poder aislar los acuíferos detríticos superiores se perfora a percusión o a rotación directa para después pasar a perforar a rotopercusión o a rotación inversa, cuando se alcanzan las calizas infrayacentes (Martos-Rosillo et al., 2004).

El diseño constructivo recomendado en los pozos que se realizan en rocas consolidadas tiene una configuración en "open-hole" (pozo abierto), con una cámara de bombeo entubada y protegida con una cementación, que evita la contaminación del pozo, protege a la tubería y permite la realización de métodos de desarrollo químicos con el sistema de "pozo cerrado".

En cualquier caso, y en relación con el cierre de la cabeza del sondeo, siempre es conveniente entubar y cementar la parte más superficial del sondeo. Al menos 12 m frente a roca estable sería el mínimo recomendable.

Los esquemas constructivos más frecuentes se presentan en la figura 4.6. El caso de la figura 4.6 A correspondería al de un sondeo que perfora un acuífero kárstico situado bajo un pequeño acuífero detrítico libre o bajo una zona de alteración superficial de un acuífero kárstico libre. La cámara de bombeo se entuba y se cementa quedando la zona de admisión sin entubar. El ejemplo representado en la figura 4.6 B sería el de un pozo diseñado para captar un acuífero carbonático confinado/semi-confinado profundo. La cámara de bombeo está entubada y cementada, al igual que la zona donde el pozo se enfrenta a la formación confinante. Se consigue con esta cementación proteger la tubería y evitar presiones radiales centrípetas sobre la tubería. Los diámetros mínimos de la zona de admisión cuando esta queda sin entubar deben ser de 150 mm, para permitir operaciones de desarrollo y rehabilitación. Si es posible, el sondeo debe ser totalmente penetrante y conviene perforar algunos metros en la formación de muro del acuífero, para que los sedimentos que caen en el fondo del pozo

no anulen zonas productivas, con el paso del tiempo. En caso de hacer esto último se debe conocer qué tipo de formación está bajo el acuífero. Cuando, por debajo del muro del acuífero existen formaciones evaporíticas que pueden llegar a salinizar el agua del pozo, es preferible no perforarlas. En caso de haber perforado la formación evaporítica, se debe proceder al aislamiento del fondo del pozo, mediante una cementación o mediante la adición de pellets de bentonita.

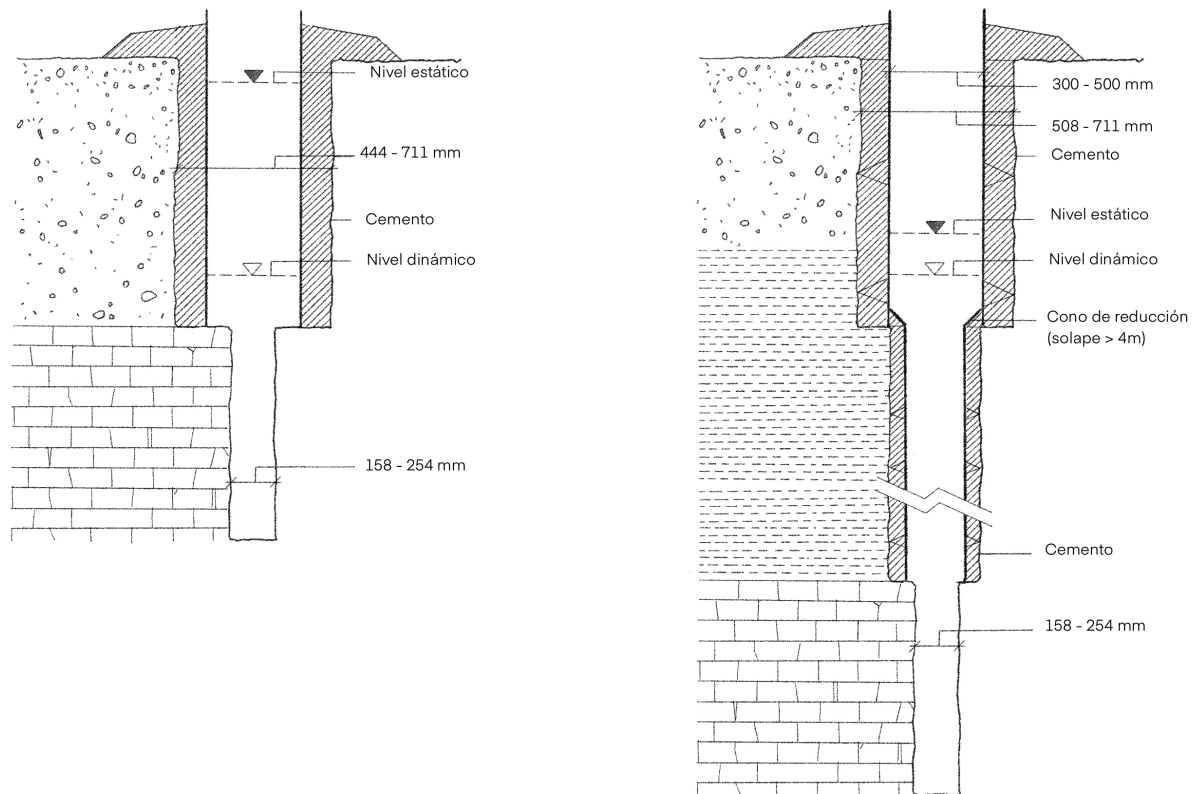


FIGURA A

FIGURA B

Figura 4.6. Esquemas constructivos de sondeos en rocas consolidadas.

En la figura 4.6 se muestran dos casos. El caso A) es el esquema de un sondeo que perfora un acuífero kárstico situado bajo un pequeño acuífero detrítico libre o bajo una zona de alteración superficial o epikarst de un acuífero kárstico libre. La cámara de bombeo se entuba y se cementa quedando la zona de admisión sin entubar. En el caso B) el pozo está diseñado para captar un acuífero carbonático confinado/semiconfinado profundo. La cámara de bombeo está entubada y cementada, al igual que la zona donde el pozo se enfrenta a la formación confinante.

4.6. Diseño de sondeos en formaciones no consolidadas

Dentro de las formaciones no consolidadas quedan incluidas una gran variedad de formaciones geológicas sedimentarias y detríticas que se caracterizan por presentar porosidad y permeabilidad intergranular y por ser formaciones que al ser perforadas pueden colapsar, si no se toman las medidas adecuadas.

Desde el punto de vista del diseño constructivo, el aspecto más importante a tener en cuenta, en los pozos que permiten la explotación de los acuíferos detríticos, es que deben ser diseñados para

estabilizar las paredes del sondeo y así evitar su colapso. Esto se consigue mediante el entubado completo de la perforación, en el que se combina la presencia de tramos ciegos con tramos filtrantes (rejillas o filtros) enfrentados a las zonas productivas. Además, para evitar la entrada de arena y para estabilizar las paredes del sondeo se recurre a la colocación de macizos o prefiltros de grava, entre la pared de la perforación y la tubería de revestimiento del pozo. A pesar de estas cuestiones, el diseño de sondeos en este tipo de acuíferos es más homogéneo, incluso, que en el caso de los pozos construidos en materiales consolidados.

El método de perforación más apropiado para este tipo de materiales es el de rotación con circulación inversa. La rotación con circulación directa también puede ser utilizada cuando no se requieren grandes diámetros, teniendo especial cuidado en realizar una buena eliminación de los lodos que aíslan los tramos productivos durante la fase de perforación. En algunos acuíferos donde los materiales detríticos tienen cierto grado de cementación se puede perforar por el método de percusión. No obstante, cada vez que se atraviesa un tramo no consolidado se tiene que estabilizar con una entubación, perdiéndose diámetro de perforación con la profundidad.

Los acuíferos no consolidados o inconsolidados más comunes están formados por formaciones detríticas terciarias y cuaternarias producto de la sedimentación fluvial. Se trata de acuíferos multicapa habitualmente muy productivos, que pueden alcanzar centenares de metros de espesor. Cuando estas formaciones no tienen mucho espesor conviene hacer pozos totalmente penetrantes, es decir que atraviesen toda la formación permeable, sin embargo, cuando se está perforando un acuífero muy potente no es necesario perforarlo totalmente. En estos casos se puede recurrir al cálculo de la transmisividad necesaria para conseguir un determinado caudal aplicando ecuaciones sencillas como la ecuación de Thiem (Custodio y Llamas, 1983).

El diámetro de perforación para construir la cámara de bombeo estará condicionado por el caudal de explotación que se pretende extraer y por las operaciones de cementación y de engravillado que se tengan que hacer en función del diseño constructivo del pozo. Para cementar o para engravillar un tramo de un pozo hacen falta, al menos, 50 mm entre la pared del sondeo y el entubado. Además, se debe tener en cuenta que el diámetro de la cámara de bombeo debe ser suficiente para subir y bajar la bomba sin problemas y para instalar tubos de control piezométrico.

La profundidad de la cámara de bombeo debe ser analizada con detalle. Si el nivel piezométrico desciende, con el paso del tiempo, la bomba también deberá descender. Hay que conocer la evolución del nivel piezométrico en el acuífero y contar siempre con una profundidad adicional como factor de seguridad.

En el epígrafe 7.3 de esta guía se describen con detalle los aspectos relacionados con el diseño del entubado de sondeos, diseño de las zonas de admisión y la selección del macizo de grava. Sin embargo, se incide aquí en dónde y qué apertura y longitud de rejilla se debe instalar en un pozo según el tipo de acuífero que se perfore.

Cuando se perforan acuíferos detríticos confinados o semiconfinados existen distintas recomendaciones en relación con la apertura y longitud de rejilla. En Driscoll (1986) se recomienda colocar tramos filtrantes en un 80-90 % del espesor saturado. La NGWA (National Ground Water Association) indica que se debe enrejillar el 70 % del espesor saturado, si este es menor de 7,5 m; el 75 % si está comprendido entre 7,5 y 15 m y el 80 % si es mayor de 15 m. En todo caso, la rejilla deberá quedar centrada con respecto al espesor del acuífero (ver figura 4.7 A).

En los acuíferos libres también existen distintas recomendaciones en relación con la longitud de rejilla a instalar. En Driscoll (1986) se recomienda colocar entre 1/3 y 1/2 del espesor saturado del acuífero, en acuíferos homogéneos. La NGWA (2017) recomienda 1/3 del espesor saturado y la Australian Drilling Industry Training Committee (1997) un 40 % de dicho espesor. La rejilla en estos acuíferos siempre debe quedar colocada hacia el fondo del acuífero (figura 4.7 B), debiendo tener especial cuidado en que ésta no quede nunca en zona no saturada y dejando unos metros de tubería ciega al final del sondeo.

En el caso de acuíferos multicapa con niveles impermeables arcillosos cohesivos y niveles productivos muy delgados hay que enrejillar y engravillar todo el sondeo con un prefiltro que pueda retener las arenas más finas (figura 4.7 C). Si los niveles de baja permeabilidad no son cohesivos hay mucho riesgo de entrada de arenas finas en el pozo.

Por último, se recomienda instalar rejillas con diámetros comprendidos entre 150 y 300 mm. Si el diámetro es inferior a 150 mm no se pueden introducir herramientas de limpieza, mientras que desde el punto de vista hidráulico no tiene sentido instalar rejillas de más de 300 mm de diámetro.

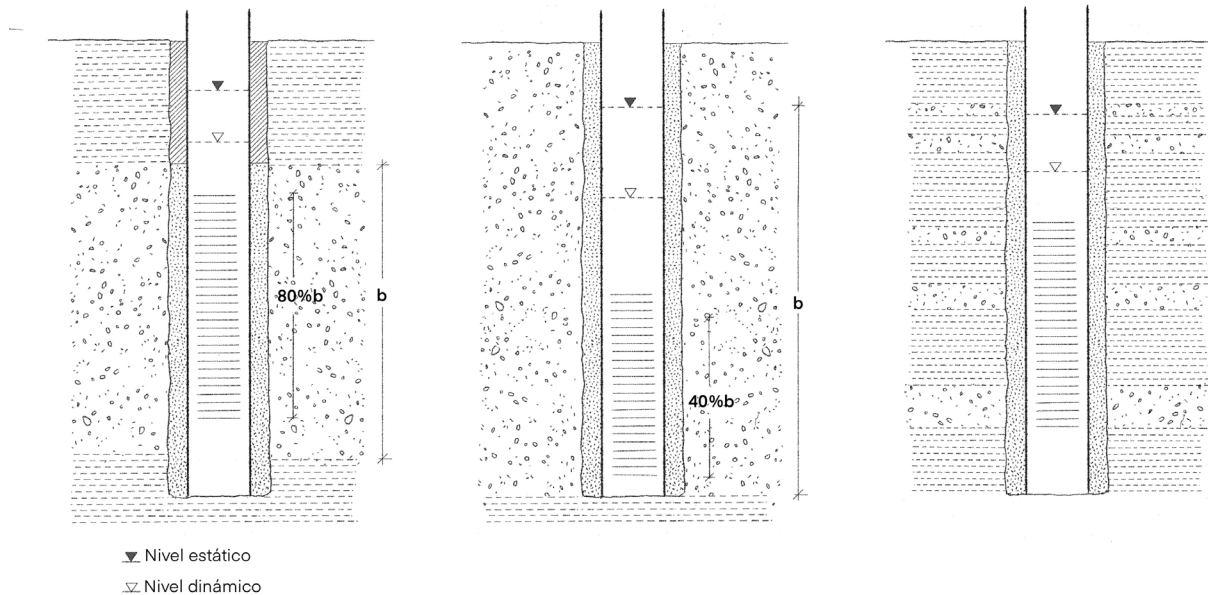


FIGURA A

FIGURA B

FIGURA C

Figura 4.7. A) Recomendaciones sobre la longitud y la posición de los tramos filtrantes en acuíferos detríticos confinados y semiconfinados. B) libres y C) multicapa.

Existen dos tipos de diseño de pozos en acuíferos detríticos. El primero, que se ha representado en la figura 4.8, es el esquema constructivo más frecuente en pozos de explotación de agua subterránea. Aunque es un diseño adecuado para acuíferos detríticos no muy profundos, se utiliza en todo tipo de acuíferos. En este diseño constructivo se puede observar que toda la columna de entubación es solidaria, estando unida la zona de admisión, donde se ubican las rejillas, con la entubación general del pozo. En el caso representado, la cámara de bombeo dispone de mayor diámetro que la zona de admisión y ambas se encuentran unidas mediante un cono de reducción. Siempre es recomendable cementar toda la cámara de bombeo además de la zona de cierre sanitario superficial. Los diámetros de la cámara de bombeo suelen quedar comprendidos entre 250 y 500 mm, mientras que los de las zonas de admisión lo están entre 180 y 250 mm. Para que la entubación quede centrada y alineada es mejor dejarla suspendida del cabezal del sondeo, colocar centradores cada 6 m y acondicionarla con un tapón de fondo perforable.

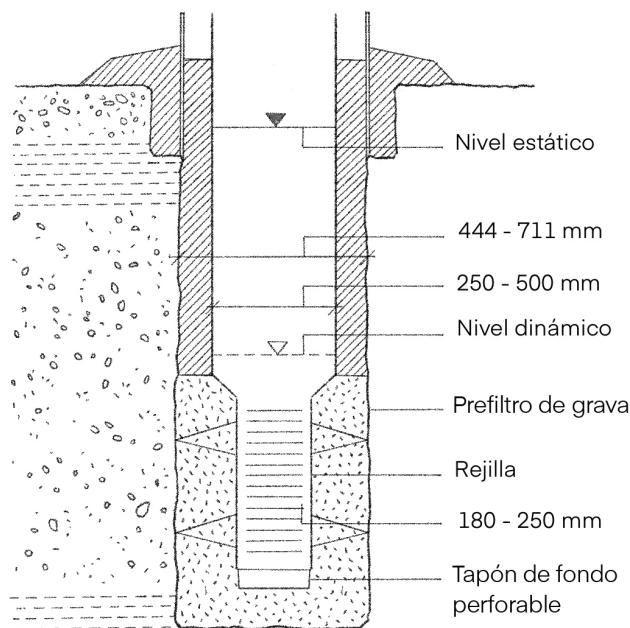


Figura 4.8. Esquema constructivo de sondeos en acuíferos detríticos.

En el caso de acuíferos detríticos profundos, en los que el peso de la columna de entubación es muy importante, se opta por colocar la tubería de admisión independiente de la entubación general del sondeo (figura 4.9). De esta forma la zona de admisión debe quedar colgada en una zona de reducción del diámetro de perforación. Este esquema constructivo obliga a colocar el macizo de grava mediante procedimientos especiales mediante piezas de distribución (cross-over). Estos sistemas se explican con mayor detalle en el epígrafe 7.3 de esta guía. Se requiere, también, que el solape entre la tubería de la zona de admisión y la zona donde se reduce el diámetro sea de un mínimo de 4 m (figura 4.9). Al igual que en el caso anterior, para facilitar la colocación adecuada del prefiltro de grava se recomienda el uso de centradores.

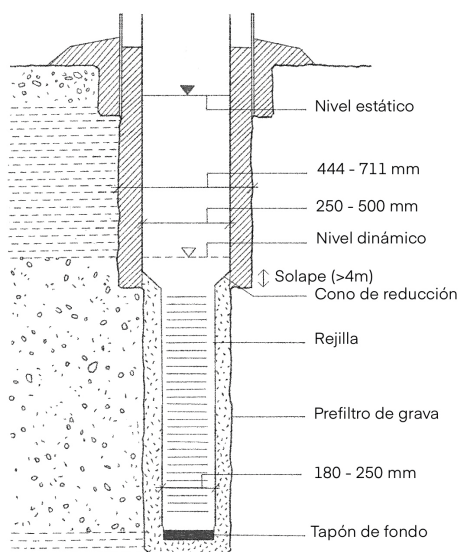


Figura 4.9. Esquema constructivo de sondeos en acuíferos detríticos profundos.

5. Tramitación legal para la construcción y aprovechamiento de un pozo de captación de agua subterránea

5.1. Introducción

La competencia en materia de aguas subterráneas renovables, tanto en el aspecto de obras de construcción como en instalaciones de extracción, seguridad, así como en los aspectos de uso privativo, recae de manera exclusiva en las diferentes administraciones hidráulicas.

En la actualidad y en general, para la construcción de un sondeo de aguas subterráneas es preciso obtener licencia de obra en el ayuntamiento donde se vaya a construir el pozo, presentar un proyecto constructivo de perforación a la autoridad autonómica competente en materia de minería (en algunas comunidades autónomas), solicitar, si el sondeo es positivo, en función del volumen anual solicitado, la autorización o concesión del uso del agua subterránea en el organismo competente de la demarcación hidrográfica correspondiente, y requerir la autorización de equipamiento electromecánico a la autoridad autonómica competente en materia de industria y energía.

El epígrafe 5.2 de este capítulo describe el marco legal referente a la captación y explotación de aguas subterráneas. En el siguiente, epígrafe 5.3, se explican los trámites necesarios hoy en día para la construcción de un sondeo. A modo de ejemplo, en el epígrafe 5.4 se mencionan algunas particularidades de las gestiones a realizar en dos demarcaciones intracomunitarias y en tres comunidades autónomas españolas.

5.2. Marco legal

El marco legal que regula la perforación de sondeos para captación de aguas subterráneas y su posterior aprovechamiento está disperso entre múltiples normas. La interpretación de estas ha creado y crea todavía disfunciones administrativas, especialmente en lo referente a la legislación minera respecto a la legislación de aguas. A modo de síntesis, y de forma esquemática, se puede agrupar el ámbito legal básico de la captación de aguas subterráneas en España en cinco grandes grupos:

- Legislación de aguas
- Legislación de minas
- Legislación de riesgos laborales
- Legislación de régimen local
- Legislación ambiental

5.2.1. Legislación de aguas

Texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado mediante Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, modificación de la Ley de Aguas de 1985. Última actualización publicada el 28 de diciembre de 2023.

– *Artículo 1. Objeto de la Ley.*

....

3. Las aguas continentales superficiales, así como las subterráneas renovables, integradas todas ellas en el ciclo hidrológico, constituyen un recurso unitario, subordinado al interés general, que forma parte del dominio público estatal como Dominio Público Hidráulico.

....

5. Las aguas minerales y termales se regularán por su legislación específica.

Se separan, al igual que en la Ley de Minas, las aguas subterráneas que corresponden al Dominio Público Hidráulico objeto de esta Ley y de sus reglamentos, de las minerales y termales objeto de la citada Ley de Minas y de los suyos.

- Artículo 2. Definición de dominio público hidráulico.

Constituyen el dominio público hidráulico del Estado, con las salvedades expresamente establecidas en esta Ley:

a. Las aguas continentales, tanto las superficiales como las subterráneas renovables con independencia del tiempo de renovación.

...

d. Los acuíferos, a los efectos de los actos de disposición o de afección de los recursos hidráulicos.

....

- Artículo 17. Funciones del Estado en relación con el dominio público hidráulico.

En relación con el dominio público hidráulico y en el marco de las competencias que le son atribuidas por la Constitución, el Estado ejercerá, especialmente, las funciones siguientes:

a) La planificación hidrológica ...

b) La adopción de las medidas precisas para el cumplimiento de los acuerdos y Convenios internacionales en materia de aguas.

c) El otorgamiento de concesiones referentes al dominio público hidráulico en las cuencas hidrográficas que excedan del ámbito territorial de una sola comunidad autónoma.

d) El otorgamiento de autorizaciones referentes al dominio público hidráulico, así como la tutela de éste, en las cuencas hidrográficas que excedan del ámbito territorial de una sola comunidad autónoma. La tramitación de las mismas podrá, no obstante, ser encomendada a las comunidades autónomas (ver artículo 53 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH)).

- Artículo 23. Funciones.

1. Son funciones de los organismos de cuenca:

a) La elaboración del plan hidrológico de cuenca así como su seguimiento y revisión.

b) La administración y control del dominio público hidráulico.

....

- Artículo 24. Otras atribuciones.

Los organismos de cuenca tendrán, para el desempeño de sus funciones, además de las que se contemplan expresamente en otros artículos de esta Ley, las siguientes atribuciones y cometidos:

a) El otorgamiento de autorizaciones y concesiones referentes al dominio público hidráulico...

b) La inspección y vigilancia del cumplimiento de las condiciones de concesiones y autorizaciones relativas al dominio público hidráulico.

....

– *Artículo 25. Colaboración con las comunidades autónomas.*

1. ...

2. *Los organismos de cuenca podrán celebrar convenios de colaboración con las comunidades autónomas, las Administraciones locales y las Comunidades de usuarios para el ejercicio de sus respectivas competencias, conforme a lo dispuesto en la legislación vigente.*

....

– *Artículo 74. Autorizaciones para investigación de aguas subterráneas.*

1. *El organismo de cuenca podrá otorgar autorizaciones para investigación de aguas subterráneas, con el fin de determinar la existencia de caudales aprovechables ...*

2.

3. *Si la investigación fuera favorable, el interesado deberá, en un plazo de seis meses, formalizar la petición de concesión, que se tramitará sin competencia de proyectos.*

– *Artículo 116. Acciones constitutivas de infracción.*

....

3. *Se considerarán infracciones administrativas:*

....

h) La apertura de pozos y la instalación en los mismos de instrumentos para la extracción de aguas subterráneas sin disponer previamente de concesión o autorización del organismo de cuenca para la extracción de las aguas.

....

Nota.- Según sentencia del Tribunal Superior de Justicia de Castilla-La Mancha (sentencia número 467/2009 de 28 octubre de 2009), para un caso ocurrido en la Confederación Hidrográfica del Guadiana, esto se debe interpretar en el sentido de que es sancionable la construcción del pozo, o la instalación de los elementos de extracción sin disponer de concesión o autorización, o la realización de ambas cosas.

– *Artículo 122. Concepto de obra hidráulica.*

A. los efectos de esta ley se entiende por obra hidráulica la construcción de bienes que tengan la naturaleza inmueble destinados a la captación, extracción ... control y aprovechamiento de las aguas ... y las que tengan como objeto la recarga artificial de acuíferos ... piezómetros, redes de calidad ...

– *Artículo 123. Régimen jurídico de la obra hidráulica.*

1. *Las obras hidráulicas pueden ser de titularidad pública o privada.*

No podrá iniciarse la construcción de una obra hidráulica que comporte la concesión de nuevos usos del agua, sin que previamente se obtenga o declare la correspondiente concesión, autorización o reserva demaniales, salvo en el caso de declaración de emergencia o de situaciones hidrológicas extremas.

....

Reglamento del Dominio Público Hidráulico y otros relacionados

Las administraciones hidráulicas, tanto a nivel estatal para las cuencas intercomunitarias como autonómico en las intracomunitarias, tienen atribuidas por ley la responsabilidad de la gestión, control y protección del Dominio Público Hidráulico, así como la consecución de los objetivos de buen estado cuantitativo y cualitativo, fijados por la Directiva Marco del Agua y su trasposición a la legislación de aguas española.

El Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos Preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas (RDPH) establece en su artículo 179.2, la documentación a presentar para solicitar un permiso de investigación, y en el artículo 180 se regula la actuación de la Administración, en el condicionado de la autorización y la documentación a entregar al final de la obra.

....

2. El organismo de cuenca establecerá las condiciones que procedan en las autorizaciones de investigación que otorgue, que, en su caso, se ajustarán a las normas fijadas para cada acuífero o unidad hidrogeológica en el plan hidrológico de cuenca. En particular, podrá establecer

....

c) Normas técnicas de ejecución, como situación de zonas filtrantes, sellado de acuíferos, aislamientos y aquellas otras que resulten convenientes para la mejor conservación de los acuíferos de acuerdo con los criterios establecidos en el anexo III, parte A.

d) Aforos, ensayos y análisis a realizar

e) Para el caso de que la investigación resultase negativa o no interesase la explotación, las normas para el sellado de la perforación y la restitución del terreno a las condiciones iniciales de acuerdo con los criterios establecidos en el anexo III, parte B.

En el punto 3 de este mismo artículo se establece también que el interesado, “Antes de transcurridos dos meses siguientes a la finalización del plazo de la autorización de investigación”, debe entregar a la Administración:

- a) Cortes geológicos de los terrenos atravesados.*
- b) Niveles piezométricos encontrados.*
- c) Características de las obras realizadas en cuanto a profundidades, diámetros, entubación, zonas de filtros y demás características de orden técnico.*
- d) Aforos, ensayos o análisis, si su realización ha sido fijada preceptivamente en la autorización de investigación.*
- e) Características de las instalaciones elevadoras y caudales máximos extraíbles, en su caso.”*

En el artículo 184.3 se dice que “Los proyectos que se presenten para obtener una concesión de aguas subterráneas tanto por el solicitante como por los que participen en el trámite de competencia, contendrán análogos documentos a los indicados para las autorizaciones de investigación”.

El Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica (RPH) establece por su parte, en el artículo 54 Directrices para la protección de acuíferos, en sus puntos 1 y 4, que el plan hidrológico determinará los criterios básicos para la protección de las aguas subterráneas y establecerá para cada masa de agua subterránea, en la medida que se requiera, normas para el otorgamiento de concesiones, referidas al caudal máximo instantáneo por captación, distancias entre aprovechamientos, profundidades de perforación y de instalación de bombas, sellado de pozos abandonados o en desuso, así como las condiciones que deben reunir las concesiones para que sean consideradas de escasa importancia.

El Real Decreto 1514/2009, de 2 de octubre, por el que se regula la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro, en trasposición de la Directiva 2006/118/CE de 12 de diciembre de 2006, en su artículo 6 *“Medidas para prevenir o limitar las entradas de contaminantes en las aguas subterráneas”*, establece en su punto 1 b), que se deberán aplicar las mejores prácticas ambientales y las mejoras técnicas disponibles especificadas en la normativa que sea de aplicación, incluyendo en particular

“... Las relativas a aquellas actividades, en particular obras subterráneas y construcción de pozos, que puedan facilitar la entrada de contaminantes en el acuífero ...”.

Por otro lado, cabe resaltar que esta guía puede ser un instrumento clave para facilitar el correcto cumplimiento del amplio marco normativo aplicable a la protección de las aguas subterráneas, sirviendo como instrumento práctico para la interpretación y aplicación coherente de estas disposiciones. Así por ejemplo, esta guía ayudará a garantizar que las actuaciones relacionadas con la construcción y operación de pozos y sondeos se adapten a las exigencias establecidas tanto por la legislación nacional como por el Derecho de la Unión Europea. A continuación, se resumen los principales fundamentos jurídicos que sustentan estas obligaciones.

Hay que recordar que conforme al Derecho de la Unión Europea *“los estados miembros habrán de aplicar las medidas necesarias para evitar o limitar la entrada de contaminantes en las aguas subterráneas y evitar el deterioro del estado de todas las masas de agua subterránea”* (artículo 4.1.b.i) de la Directiva 2000/60/CE y que *“siempre que sea técnicamente posible, se tendrán en cuenta las entradas de contaminantes procedentes de fuentes de contaminación difusas que tengan un impacto en el estado químico de las aguas subterráneas”* (artículo 6.2 de la Directiva 2006/118/CE). Téngase en cuenta que, como señala la adaptación española de esta última directiva, la adopción de medidas de prevención es importante en las *“obras subterráneas y construcción de pozos, que puedan facilitar la entrada de contaminantes en el acuífero”* (artículo 6.1.b del Real Decreto 1514/2009).

Igualmente es relevante considerar que según la jurisprudencia del Tribunal de Justicia de la Unión Europea al aplicar el derecho interno y, en particular, las disposiciones de una normativa específicamente adoptada para ejecutar lo exigido por una directiva, los órganos jurisdiccionales nacionales están obligados a interpretar ese derecho, en la medida de lo posible, a la luz de la letra y de la finalidad de esta directiva para alcanzar el resultado que ésta persigue y, por lo tanto, atenerse al artículo 249 CE, párrafo tercero» (sentencia del Tribunal de Justicia de la Unión Europea de 10 de abril de 1984, C-14/83, Colson y Kamann, EU:C:1984:153, apartado 26).

Conforme a la citada jurisprudencia las autoridades españolas deben interpretar el artículo 180.2 del Real Decreto 849/1986 conforme al artículo 4.1.b.i) de la Directiva 2000/60/CE y artículo 6.2 de la Directiva 2006/118/CE, y por lo tanto, aplicar las medidas necesarias para evitar o limitar la entrada de contaminantes en las aguas subterráneas y evitar el deterioro del estado de todas las masas de agua subterránea, lo que comprende necesariamente establecer y exigir el cumplimiento de unas normas técnicas de ejecución de pozos y sondeos.

Por su parte, el Real Decreto 907/2007, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica establece en su artículo 54: *“El plan hidrológico determinará los criterios básicos para la protección de las aguas subterráneas”* (54.1) y *“establecerá para cada masa de agua subterránea, en la medida que se requiera, normas para el otorgamiento de concesiones, referidas al caudal máximo instantáneo por captación, distancias entre aprovechamientos, profundidades de perforación y de instalación de bombas, sellado de pozos abandonados o en desuso, así como las condiciones que deben reunir las concesiones para que sean consideradas de escasa importancia”* (54.4).

Competencia en materia de aguas subterráneas renovables

El análisis detallado de la legislación vigente pone de manifiesto, de acuerdo con el principio de prevalencia, que la competencia en materia de aguas subterráneas renovables, tanto en el aspecto de

obras de explotación como en instalaciones de extracción (consideradas obras hidráulicas por la Ley de Aguas), seguridad, así como en los aspectos concesionales de caudales y volúmenes aprovechables, recae de manera exclusiva en las diferentes administraciones hidráulicas.

Diversas sentencias de los Tribunales Superiores de Justicia (Castilla y León (23 diciembre 1998), Madrid (17 febrero 2015) y Cataluña (22 enero 2015) y del Tribunal Supremo (sentencia 66/2015) han aclarado cuestiones relacionadas con las competencias administrativas en materia de perforaciones y aprovechamientos de aguas subterráneas. Estas resoluciones, junto con el informe de la Abogacía del Estado de Zaragoza (4 enero 2013), confirman que la autorización de pozos corresponde de forma inequívoca a la autoridad competente en aguas subterráneas, y no a la autoridad minera, salvo en casos específicos relacionados con aprovechamientos mineros, aguas minerales, termales o perímetros de protección minera. En la misma línea, un informe de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (1 febrero 2017) refuerza esta interpretación. Como consecuencia, administraciones como la Agencia Catalana del Agua y la Administración de Minas de la Comunidad de Madrid han dejado de considerar estas captaciones como competencia del ámbito minero.

5.2.2. Legislación de minas y legislación de riesgos laborales

La Ley de Minas 22/1973, de 21 de julio, en su artículo segundo, apartado 2, establece que:

“En cuanto al dominio de las aguas se estará a lo dispuesto en el Código Civil y leyes especiales, sin perjuicio de lo que establece la presente ley en orden a su investigación y aprovechamiento”.

En su artículo 3 se clasifican los recursos objeto de la ley:

- A) ...
- B) *Incluye, con arreglo a las definiciones que establece el capítulo primero del título IV, las aguas minerales, las termales ...*
- C)

Artículo 117.

Uno. Incumbe al Ministerio de Industria, en la forma que reglamentariamente se establezca, la inspección y vigilancia de todos los trabajos de exploración, investigación, explotación y aprovechamiento de todos los recursos regulados por esta Ley ... Las referidas funciones de inspección y vigilancia en lo relativo a prevención de accidentes de trabajo y de enfermedades profesionales, así como de la exacta observancia de las normas de seguridad e higiene en el trabajo, se circunscriben a las explotaciones mineras de cualquier orden y a cuantos trabajos regulados por esta Ley exijan la aplicación de técnica minera.

El Reglamento General del Régimen de la Minería (RD 2857/1978) establece en su artículo 1.4 que:

... “Se entiende necesaria la aplicación de técnica minera en los trabajos que a continuación se enumeran, cuando estos tengan por finalidad la investigación y aprovechamiento de recursos minerales.

1º Todos los que se ejecuten mediante labores subterráneas cualquiera que sea su importancia.

2º Los que requieran el uso de explosivos, aunque sean labores superficiales.

3º Los que realizándose a roza abierta y sin empleo de explosivos, requieran la formación de cortas, tajos o bancos de más de tres metros de altura.

4º Los que, hallándose o no comprendidos en los casos anteriores, requieran el empleo de cualquier tipo de maquinaria para la investigación, extracción, preparación para concentración, depuración o clasificación.

5º Todos los que se realicen en las salinas marítimas y lacustres y en relación con aguas minerales, termales y recursos geotérmicos”.

En su artículo 2.2 se establece, al igual que en la Ley de Minas de 1973, que *“en cuanto al Dominio de las Aguas, se estará a lo dispuesto en el Código Civil y leyes especiales, sin perjuicio de lo que establece la Ley de Minas y el presente Reglamento en orden a su investigación y aprovechamiento.”*

Por su parte, en su artículo 5, transcribe la clasificación de los recursos minerales de la Ley de Minas.

Por tanto, de acuerdo a la definición de técnica minera, que implica la investigación y aprovechamiento de recursos minerales, y dado que los recursos de aguas subterráneas no se encuentran incluidos en ninguno de los grupos (A, B, C y D) de la Ley de Minas y de este Reglamento, debe entenderse que los sondeos de captación de aguas subterráneas no se aplica técnica minera.

La Ley de Minas excluye de su ámbito de aplicación a las aguas subterráneas, a excepción de los trabajos de investigación, control y aprovechamiento de las aguas objeto de la ley, es decir, las minerales, minero medicinales o termales.

El Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera, entre sus 169 artículos, establece en el artículo 108 lo siguiente:

- *Los trabajos de prospección y explotación de aguas subterráneas, mineras y minero medicinales, precisarán aprobación previa.*
- *Periódicamente se efectuará un reconocimiento detallado de los mismos con objeto de controlar su evolución para evitar su agotamiento o sobreexplotación.*

En este reglamento se introduce, junto a las aguas minerales (mineras según el reglamento) y mineromedicinales, las aguas subterráneas, excluidas de la Ley de Minas y del Reglamento General de la Minería.

En relación con las normas de seguridad minera, hay que referirse también a la Directiva Europea 89/391/CEE y a la 92/91/CEE, traspuesta esta última a la legislación española por el Real Decreto 1389/1997, modificando el artículo 109 del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera. Dicha directiva, en su artículo 2 contiene las siguientes definiciones:

a) *Industrias extractivas por sondeos: todas las industrias que realizan actividades:*

- *De extracción propiamente dicha de minerales por perforación de sondeos y/o*
- *De prospección con vistas a dicha extracción*
-

Por su parte, la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, establece en su artículo 7.2 que *“las funciones de asesoramiento, vigilancia y control del cumplimiento de la normativa de seguridad y salud laboral, continuarán siendo desarrolladas, en lo referente a los trabajos en minas, canteras y túneles que exijan la aplicación de técnica minera, a los que impliquen fabricación, transporte, almacenamiento, manipulación y utilización de explosivos o el empleo de energía nuclear, por los órganos específicos contemplados en su normativa reguladora”.*

Existe suficiente jurisprudencia que establece que un reglamento tiene por función el desarrollo y concreción de una ley, pero no puede introducir aspectos no contemplados en la misma, corroborando que no se debe aplicar el Reglamento de Normas Básicas de Seguridad Minera a los sondeos de captación de aguas subterráneas (obras hidráulicas según la Ley de Aguas).

Por otra parte, la gestión de la seguridad en una máquina de sondeos para captación de aguas subterráneas es bastante más simple que en cualquier obra de construcción o de ingeniería civil. Los riesgos asociados al uso de estas máquinas no son superiores a los de una grúa-pluma usada para construcción o una máquina de pilotaje, o un bulldozer. Parece no estar justificada la aplicación de

normas de seguridad minera que, por lo que se ha expuesto en el análisis de la Ley de Minas y del Reglamento General del Régimen de la Minería, no son aplicables más que a la investigación y explotación de recursos minerales recogidos en la Ley de Minas. A los sondeos de captación y explotación de aguas subterráneas se les debe aplicar, en cuanto a normas de seguridad, lo establecido en la Ley de Prevención de Riesgos Laborales (Ley 31/1995) y sus decretos de desarrollo:

- Real Decreto 487/1997 de 14 de abril sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la manipulación manual de cargas que entrañe riesgos, en particular dorsolumbares para los trabajadores.
- Real Decreto 773/1997 de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual.
- Real Decreto 1215/1997 de 18 de julio por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo.
- Ley 54/2003, de 12 de diciembre, de reforma del marco normativo de la prevención de riesgos laborales.
- Real Decreto 171/2004, de 30 de enero, por el que se desarrolla el artículo 24 de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, en materia de coordinación de actividades empresariales.

5.2.3. Legislación de régimen local

Para la construcción de un pozo o sondeo de aguas subterráneas, según la Ley 7/1985, de 2 de abril, Reguladora de las Bases de Régimen Local y sus posteriores actualizaciones, es preciso obtener licencia de obra en el ayuntamiento donde se vaya a construir el pozo. En algunas ocasiones, de cara a la tramitación municipal, el proyecto de la captación hidrogeológica se recoge de forma integrada en un proyecto más amplio de edificación al que se refiere la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación (en sus artículos 2 y 4, entre otros). También es preciso considerar que las leyes del suelo de ámbito autonómico dan las instrucciones a los ayuntamientos en relación con los procedimientos de otorgamiento de licencias de obra, como puede suceder con las captaciones a realizar en terrenos no urbanizables.

5.2.4. Legislación medioambiental

La Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental, es la normativa básica donde se pueden identificar los aspectos medioambientales que hay que considerar en un proyecto de captación de aguas subterráneas. En esta normativa el requisito del estudio de evaluación de impacto ambiental presenta dos modalidades, según el tipo de proyecto: evaluación de impacto ambiental ordinaria o evaluación de impacto ambiental simplificada.

Los requerimientos medioambientales en relación con la captación de aguas subterráneas se recogen en el artículo 7 de la citada normativa: *“Ámbito de aplicación de la evaluación de impacto ambiental”*. En este artículo se indica que serán objeto de una evaluación de impacto ambiental ordinaria los proyectos comprendidos en el Anexo I, como son los proyectos de ingeniería hidráulica y de gestión de agua que correspondan a *“proyectos para la extracción de aguas subterráneas o la recarga artificial de acuíferos, si el volumen anual de agua extraída o aportada es igual o superior a 10 hectómetros cúbicos”* (anexo I, Grupo 7-b). También en este artículo 7 se indica que serán objeto de una evaluación de impacto ambiental simplificada los proyectos de ingeniería hidráulica y de gestión de agua que correspondan a *“...proyectos de recarga artificial de acuíferos no incluidos en el anexo I”, o a “proyectos de extracción de aguas subterráneas de más de un 1 % del recurso*

disponible del acuífero correspondiente que no se encuentren incluidos en el anexo I (anexo II, Grupo 8-a). Además, en el anexo II al que se refiere el artículo 7, se incluyen también las “perforaciones profundas para el abastecimiento de agua” (anexo II, Grupo 3-a- 3º). En este artículo 7 (apartado 2. b) también se indica que serán objeto de una evaluación de impacto ambiental simplificada los proyectos no incluidos ni en el anexo I ni el anexo II (entre los que se encuentran los supuestos comentados antes) pero que puedan afectar de forma apreciable, directa o indirectamente, a espacios protegidos de la Red Natura 2000. Por lo tanto, cuando se esté proyectando una captación hidrogeológica es importante evaluar si existe posibilidad de afección a algún espacio del tipo indicado.

Las comunidades autónomas, en el uso de sus competencias, elaboran normativas que amplían los contenidos de la legislación estatal referida en los anteriores párrafos, por lo que es preciso también consultar estas legislaciones al realizar un proyecto de captación de aguas subterráneas.

5.3. Trámites

De forma general a nivel nacional, para la realización de una obra de perforación de un pozo o sondeo, a fecha de hoy, es necesario obtener las siguientes autorizaciones:

- Propiedad del terreno.
- Ayuntamiento.
- Organismo autonómico competente en materia de minería (según la comunidad autónoma).
- Organismo autonómico competente en materia de industria.
- Confederación hidrográfica u organismo autonómico competente.
- Órgano administrativo de medioambiente.

A continuación, se recoge en forma resumida el contenido de estas autorizaciones.

5.3.1. Propietario del terreno

Habitualmente el propietario de un terreno es el que efectúa los pozos para captación de agua, pues la titularidad de la obra es del dueño de la finca donde se ubica el sondeo. Pero existen ocasiones en las que esto no es así, como, por ejemplo, cuando se desea realizar sondeos de investigación en un determinado terreno dado; en estos casos es preciso proceder en primer lugar a obtener el permiso del dueño de la finca. Lo más adecuado es que el permiso se formalice mediante un escrito.

En los terrenos de titularidad pública, tales como Dominio Público Hidráulico, montes públicos, etc., es necesario ajustarse a lo establecido en las correspondientes normativas (Ley de Montes, Ley de Aguas, etc.) y obtener las correspondientes autorizaciones en los organismos competentes (Servicios de Montes de las Consejerías de Agricultura, Comisarías de Agua de los organismos de cuenca, organismos autonómicos, etc.).

5.3.2. Ayuntamiento

Para efectuar una perforación de un pozo o sondeo, como en general ocurre en cualquier tipo de obra que se realiza en un determinado municipio, es necesario solicitar y obtener la licencia de obras en el correspondiente ayuntamiento. Para obtener esta licencia es preciso presentar el proyecto constructivo de la obra. Las tasas que hay que abonar son función del presupuesto que figura en el proyecto, aplicándole un porcentaje, que depende de que el ayuntamiento considere la perforación como obra mayor o menor.

En el caso de los pozos de agua no es necesario solicitar la licencia de apertura de obra como ocurre en otro tipo de pozos como son los de explotación de hidrocarburos u otros recursos minerales, en cuyo caso es necesario solicitar la mencionada licencia de apertura puesto que dichas actividades son consideradas como actividades molestas, insalubres, nocivas y peligrosas.

Además, los ayuntamientos deben requerir a los solicitantes los proyectos y autorizaciones administrativas mencionadas en los siguientes párrafos.

En el caso de que se declare de Utilidad Pública la Administración General del Estado no precisa de licencias ni del pago de tasas a los ayuntamientos para ejecutar sus sondeos.

5.3.3. Organismo autonómico competente en materia de minería

En la actualidad, a nivel estatal, las competencias de la autorización de pozos y sondeos para la captación de las aguas subterráneas corresponden a la Administración hidráulica. Por otro lado, en algunas comunidades autónomas es la autoridad minera el órgano competente en la gestión de obras y perforación de pozos y sondeos. En estos casos para obtener estas autorizaciones hay que acudir a las unidades, secciones o servicios de minas de los servicios territoriales de las comunidades autónomas, en la provincia donde vaya a realizarse la perforación. En estas comunidades autónomas hay que entregar el proyecto constructivo de la obra en la unidad de minas, elaborado por técnico competente y visado por el colegio profesional correspondiente, proponiendo el director facultativo de la misma. El proyecto debe incluir también la titularidad de los terrenos en donde radican las obras. Por otro lado, la empresa que va a ejecutar las obras debe presentar también a la administración minera el documento de seguridad y salud, así como el de gestión de residuos. La empresa tiene que estar inscrita en el registro industrial de empresas de dicho servicio, habiendo presentado para ello los certificados de maquinaria correspondientes. Cabe recordar que, como en todas las obras, la empresa debería comunicar a la autoridad laboral la apertura del centro de trabajo (con copia del documento de seguridad y salud, proyectista, promotor y coordinador de seguridad). A continuación, la unidad de minas inicia un expediente administrativo de autorización y una vez aprobado el proyecto, y aceptado el director facultativo, se comunica la aprobación del comienzo de las obras, previo pago de las correspondientes tasas. Al acabar la obra, se debe presentar en la unidad de minas el certificado final de obra firmado por el director facultativo, en donde quede descrito el acabado de la obra y las condiciones de seguridad frente a terceros.

5.3.4. Organismo autonómico competente en materia de industria

Una vez recibida la resolución de inscripción o concesión del aprovechamiento desde el organismo competente en materia de aguas, para realizar el equipamiento electromecánico del pozo que permita la extracción de agua subterránea es necesario presentar un proyecto en el organismo competente en materia de industria y energía. Estas competencias están transferidas a las comunidades autónomas, y por tanto hay que dirigirse también a las unidades de industria y energía de los servicios territoriales de las comunidades autónomas, en la provincia donde se efectúe el equipamiento. En algunas comunidades autónomas es la propia unidad de minas la que realiza los trámites del equipamiento electromecánico.

Si no se utiliza un generador eléctrico o un motor de gasoil, para proceder a la solicitud de autorización es preciso presentar un proyecto de electrificación suscrito por un técnico competente, y hacer un nombramiento de director facultativo. El organismo competente requerirá también que la instalación eléctrica sea realizada por un instalador autorizado.

A la finalización de la instalación, el director facultativo emitirá el certificado final de la obra ante el organismo que dio la autorización, y que también será el que finalmente concederá la autorización de puesta en servicio de la instalación.

Para la fase de explotación, si se necesita instalar una nueva línea eléctrica o modificar una existente, es necesario presentar también un proyecto de instalación eléctrica en baja tensión y un certificado de la instalación en la unidad territorial de industria.

5.3.5. Confederación hidrográfica u organismo autonómico competente en materia de aguas

Al finalizar el equipamiento electromecánico de la captación de agua subterránea, y previamente a su puesta en servicio, es necesario solicitar autorización, acorde con la normativa de aguas. El permiso tiene carácter de autorización o concesión, según se trate respectivamente de volúmenes anuales de aprovechamiento inferiores o superiores a 7.000 m³ en un mismo predio. Cuando se trata de distintos predios, cualquier volumen precisa de concesión.

La autorización o concesión del uso del agua subterránea se debe solicitar en el organismo competente de la demarcación hidrográfica correspondiente. En las cuencas hidrográficas intercomunitarias el organismo competente es el organismo de cuenca correspondiente, a través de la Comisaría de Aguas. En este caso las competencias recaen en la Administración General del Estado, a través de las confederaciones hidrográficas. En las cuencas hidrográficas intracomunitarias las competencias para autorización y concesión están atribuidas al organismo autonómico competente en materia de aguas. Una excepción a lo anteriormente señalado es la captación y aprovechamiento de las aguas minerales, cuya competencia corresponde al organismo minero en el ámbito autonómico.

Como ya se ha indicado anteriormente, en estricto rigor, la autorización de la confederación u organismo competente es necesaria para el alumbramiento de agua y no es obligatoria para la realización de la obra en sí misma. La legislación actual no regula la obligatoriedad de solicitar una autorización de perforación previa para todos los casos o para determinados supuestos. Por ello, y como además ocurre que la obra de perforación de un sondeo tiene como finalidad la extracción de agua, lo más práctico es acudir a la comisaría de aguas para solicitar información, previamente a la realización de la obra. Asimismo, en las páginas web de las distintas confederaciones u organismos competentes se pueden encontrar los formularios e instrucciones para solicitar autorizaciones de investigación de aguas subterráneas y autorizaciones y concesiones de las mismas, en función del caudal a solicitar y del uso.

Es obligatorio obtener autorización de la confederación hidrográfica, o del organismo autonómico competente, cuando el sondeo se vaya a realizar en zona de policía, afecte a una zona húmeda o esté en una masa de agua subterránea en riesgo, independientemente de la titularidad del terreno. Este permiso es también necesario, con mayor motivo si cabe, cuando el sondeo vaya a realizarse en zona de Dominio Público Hidráulico. Asimismo, se debe recordar que los planes hidrológicos de cuenca tienen sus propias normativas y éstas pueden contener indicaciones constructivas y de equipamiento que deben contemplarse en un proyecto de ejecución de sondeo.

Hay que tener en cuenta que para la ejecución de un pozo es frecuente la necesidad de agua para la elaboración del lodo de perforación. En el caso en que dicho suministro se realice a partir de cauce público es necesaria la autorización previa del organismo competente en materia de agua. Cuando se utilizan métodos de perforación que precisan de espumante que facilite la expulsión del ripio deberá procurarse, si se encuentra en las proximidades de algún cauce, que el retorno del sondeo no alcance las aguas superficiales. Adicionalmente es necesario solicitar autorización a la confederación u organismo competente si se emplean técnicas de desarrollo de pozos (e.g., acidificación). Cabe recordar que la inyección de ácido al acuífero sin permiso podría considerarse como un vertido peligroso al acuífero. Una última consideración con respecto a los ensayos de bombeo, también es necesario obtener un permiso de vertido a cauce público.

5.3.6. Organismo administrativo de medioambiente

Es muy importante solicitar información previa a la realización de un pozo o sondeo sobre los requisitos medioambientales que le son de aplicación de acuerdo con la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de Evaluación Ambiental. Cabe destacar que, además, la mayoría de las comunidades autónomas han desarrollado una amplia legislación en materia medioambiental, y que esta legislación está en permanente modificación o ampliación.

La realización de los pozos y sondeos para captación de agua puede requerir autorizaciones de los organismos medioambientales por los siguientes motivos:

- Realización de la obra de perforación.
- Extracción de agua en los pozos.
- Ubicación de la obra en zonas protegidas.
- Realización de ensayos de bombeo.
- Realización de obras de acceso.
- Formas de eliminación de los residuos de la perforación.

En algunas comunidades autónomas, la realización de sondeos para captación de agua subterránea se encuentra entre las actividades que obligatoriamente deben ser sometidas a estudios previos de impacto ambiental de carácter preliminar. Esa obligación se basa en las obras de movimiento de tierras que están asociadas a la realización de un sondeo como son la construcción de pistas, accesos, explanaciones, excavación de balsas, labores todas ellas previas a la ejecución de la obra. Como ejemplo de este último supuesto cabe destacar los estudios preliminares de impacto ambiental (EPIA) que requiere la administración autonómica de Asturias para la realización de perforaciones, aunque estas no tengan como objetivo la captación de aguas subterráneas.

Posteriormente a la finalización de la perforación, debe realizarse una adecuada restauración de los terrenos, operación que se somete a aprobación del organismo medioambiental.

Además de los supuestos de extracciones de agua y sondeos profundos, indicados en el apartado anterior de este capítulo, a veces cuando se realiza una captación de agua subterránea es necesario realizar estudios de impacto ambiental, cuando la perforación esté situada en zona de especial interés (parajes protegidos, etc.), en función de los requerimientos de la autoridad competente en materia medioambiental.

5.4. Ejemplos de tramitación administrativa

Se han recogido en esta sección ejemplos de los trámites necesarios para la obtención de una concesión o autorización de aguas subterráneas en dos demarcaciones intracomunitarias (Islas Baleares y Cuencas Internas de Cataluña) y en tres comunidades autónomas (Madrid, Comunidad Valenciana y Andalucía). A través de estos ejemplos se quiere reflejar la diversidad de trámites existentes a nivel nacional.

5.4.1. Demarcación Hidrográfica de las Islas Baleares

En la normativa del segundo ciclo 2015-2021 del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de las Islas Baleares, se incluye el artículo 126, en el que se describe con detalle la tramitación administrativa de concesiones y autorizaciones. Además, el artículo 127 detalla la legalización de los sondeos, y el 128 explica la modificación y revisión de las concesiones y autorizaciones. Se resume a continuación el contenido de los tres artículos.

Con carácter general, en las Islas Baleares, el procedimiento para la tramitación de una autorización o concesión de aguas subterráneas consta de tres fases que son:

- Fase 1. Aprobación de la realización del sondeo. Cada una de las autorizaciones puede estar conformada por uno o varios sondeos.
- Fase 2. Autorización del afloramiento y explotación de aguas subterráneas u otorgamiento de concesión y explotación de aguas subterráneas.
- Fase 3. Autorización de las instalaciones de extracción o impulsión (bombas).

En el caso de las autorizaciones, la fase 1 y la fase 2 se realizarán simultáneamente, obteniéndose ambos permisos en una resolución conjunta.

Una vez obtenida la aprobación del sondeo, el plazo para la finalización de la totalidad de las obras, y por lo tanto para la solicitud de sus respectivas autorizaciones (fases 2 y 3), será de un año.

Fase 1. Para la tramitación de la aprobación del sondeo se presentará solicitud según modelo normalizado acompañado de:

- a) Documento acreditativo del pago de la tasa (Modelo 046), concepto autorización de afloramiento y explotación, o concepto concesión de aguas subterráneas.
- b) Fotocopia del NIF, CIF o equivalente del titular.
- c) Fotocopia del NIF o equivalente y poder de quien firma la solicitud, si es distinto del titular.
- d) Escritura de constitución de la empresa en el caso de que el solicitante sea una empresa y poder de quien firme la solicitud, si procede.
- e) Inscripción actualizada en el Registro de la Propiedad o documento que acredite la propiedad de la finca.
- f) Documentos justificativos del uso del agua (según el artículo 120 del PHDHIB).
- g) Proyecto de labores subterráneas a realizar, suscrito y firmado en cada una de sus partes por técnico competente, y según el Real Decreto 863/85, de 2 de abril, por el que se aprueba el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera y su ITC 06.0.07 "Prospección y explotación de las aguas subterráneas".
- h) En función del uso que se pretenda para la concesión de agua subterránea, se deberán aportar otros documentos exigidos en la normativa vigente.

Una vez obtenida la aprobación para realizar el sondeo para una concesión de aguas subterráneas, o la autorización simultánea de alumbramiento y explotación de aguas subterráneas y aprobación para realizar el sondeo, la empresa encargada de la perforación del mismo deberá exigir a la persona titular antes del inicio de las obras, la documentación de dicha autorización y habrá de disponer de una copia en el lugar de trabajo.

Fase 2. Para el otorgamiento de concesión y explotación de aguas subterráneas, se presentará solicitud según modelo normalizado, los documentos necesarios propios de cada uso que disponen el TRLA y el RDPH y la siguiente documentación:

- a) Documento acreditativo del pago de la tasa (Modelo 046), concepto concesión de aguas subterráneas.
- b) Documento justificativo del uso y del volumen máximo anual a solicitar, si no se ha presentado en la solicitud de sondeo o este no es suficiente.

- c) Certificado de la dirección de obra por parte de la persona responsable que indique que en la ejecución del sondeo se han cumplido las normas técnicas del proyecto.
- d) Hoja de características del sondeo con caracterización de la litología atravesada, incluyendo descripción y registro fotográfico de la misma, acuíferos encontrados y niveles estáticos.
- e) Niveles dinámicos, caudal punta y caudal medio de explotación previstos.
- f) Plano de la zona con la distancia al aprovechamiento más cercano y con un inventario de puntos de aprovechamiento de agua.
- g) En el caso de estar en condiciones de tomar una muestra de agua, analítica del agua por laboratorio acreditado con determinación, como mínimo, de conductividad, cloruros, sulfatos y nitratos. Se deberá acompañar con la identificación del punto de muestreo. En caso contrario se presentará en la fase 3.

Fase 3. Autorización de las instalaciones de extracción o impulsión (bombas).

Se presentará solicitud según modelo normalizado e irá acompañada de:

- a) Documento acreditativo del pago de la tasa (Modelo 046), concepto puesta en servicio de las instalaciones de elevación.
- b) Certificado de la dirección de obra subterránea suscrito por la persona directora facultativa.
- c) Hojas de características del sondeo suscritas por la persona anterior. Esta será responsable legal de la veracidad de los datos de la hoja de características.
- d) Modelo normalizado de memoria técnica de diseño.
- e) En el caso de no haberla presentado previamente, analítica del agua por laboratorio acreditado con determinación, como mínimo, de conductividad, cloruros, sulfatos y nitratos. Se deberá acompañar con la identificación del punto de muestreo.
- f) Certificado de adecuación emitido por la persona directora facultativa.
- g) Certificado de persona instaladora eléctrica autorizada.

Para la ejecución de un pozo es necesario presentar en el proyecto adjunto a la solicitud de autorización o concesión el diseño constructivo según las condiciones técnicas del artículo 130 del PHDHIB.

5.4.2. Cuencas Internas de Cataluña

La Agencia Catalana del Agua (ACA) tiene la competencia de la gestión del agua y del Dominio Público Hidráulico en las Cuencas Internas o Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña (ríos que nacen y desembocan en las costas de Cataluña). Se distinguen tres casos en que es necesario pedir autorización previa para hacer una nueva perforación en el ámbito de las cuencas internas de Cataluña (CIC):

1. Concesión y construcción de pozos de más de 7.000 m³/año código formulario H0330 (enlace web <https://aca.gencat.cat/es/tramits/Concessions.-Captacions-daigues-i-construccio-de-pous-de-mes-de-7.000-m3-any?moda=1>).
2. Autorización administrativa previa para la perforación de pozos hasta 7.000 m³/año en masas declaradas en mal estado cuantitativo, químico, o en riesgo de estarlo, en zona de policía o acuífero protegido código formulario H0346 (enlace web <https://aca.gencat.cat/es/tramits/Aprofitaments-daigues-subterranyes-fins-a-7.000-m3-any-i-daigues-pluvials>).

3. Perforación de pozos hasta 7.000 m³/año en el caso específico de que el agua del pozo salga del predio por lo que se tramitaría como una concesión de aguas código formulario H0330 (enlace web <https://tramits.gencat.cat/ca/tramits/tramits-temes/Concessions.-Captacions-dai-guees-i-construccio-de-pous-de-mes-de-7.000-m3-any>).

Cuando se trata de una nueva captación de menos de 7.000 m³/año que no cumpla ni el caso 2 ni el caso 3, sólo se requiere una comunicación a la Administración para que inscriba el aprovechamiento en el Registro de Aguas.

En las CIC, las solicitudes de nueva perforación (o investigación de aguas subterráneas) presentadas a la Agencia Catalana del Agua (en los tres casos expuestos anteriormente) deben contener una memoria técnica con los datos mínimos suficientes para poder informar al respecto (técnicos, justificativos y la acreditación de la disponibilidad del terreno). A partir de que se solicita una nueva perforación, los siguientes trámites son:

- Informe técnico de viabilidad favorable.
- Envío del informe al interesado.
- Petición de informe al ayuntamiento.
- Si es necesario, petición de informe a otras entidades (comunidades de usuarios, parques naturales, etc.).
- Pago de la exposición pública a cargo del interesado.
- Exposición pública (30 días) en el Diario Oficial de la Generalitat. Si la petición cumple el artículo 38.8 no se requiere la información pública (Decreto 1/2017, de 3 de enero, por el que se aprueba el Plan de gestión del distrito de cuenca fluvial de Cataluña para el período 2016-2021. Artículo 38.8 "La sustitución de un pozo inscrito por otro de características similares no requiere de comunicación administrativa siempre que se realice dentro de la misma finca, a una distancia no superior a los 30 m del sondeo original y que se mantengan las mismas capacidades de extracción que las del pozo a substituir").
- Recepción de informes solicitados. Conforme a lo definido en el artículo 80 de la Ley 39/2015 del Procedimiento Administrativo Común de las Administraciones públicas, en caso de no haber respuesta se continúa con el trámite.
- Resolución de obras (si no hay ninguna alegación durante el proceso de exposición pública) con un plazo determinado, siendo el máximo por ley de 2 años para ejecutar las obras. Una vez transcurrido el plazo otorgado, el titular tiene que proporcionar una memoria final de obra que contenga todo lo requerido en la resolución (es la misma que fija el informe técnico en sus conclusiones). A partir de esa información se tramita directamente la concesión manteniendo el mismo número de expediente.

El trámite de investigación conlleva un tiempo de 3 a 4 meses desde que se presenta la solicitud hasta que se resuelve. Si en los casos previstos en el Plan de Gestión del Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña no hiciera falta la información pública, el plazo se reduce entre 1 y 1,5 meses.

En la resolución de investigación, como en la de concesión, se informa que esta autorización no exige de otras autorizaciones que se deban pedir, como por ejemplo la licencia de obra municipal al ayuntamiento.

Otras condiciones interesantes que se suelen incluir en la resolución son:

- La resolución permite al interesado realizar hasta 2 o 3 nuevas perforaciones siempre que las anteriores sean negativas, se comunique y justifique adecuada y previamente y la ACA lo autorice.

- En el caso de una investigación que resulte negativa o que no interese su explotación, el interesado presentará un proyecto de sellado de la perforación y restitución del terreno a sus condiciones iniciales, conforme a la guía de clausura y sellado de pozos de la ACA, disponible en la web.
- El interesado deberá comunicar mediante correo electrónico la fecha de inicio de las obras del nuevo sondeo, con una antelación mínima de 2 semanas para que se pueda realizar una visita “in situ” si se considera necesario.

A diferencia de otras comunidades, no se pide informe a otro estamento de la Generalitat ni a la Dirección General de Energía, Seguridad Industrial y Seguridad Minera, donde sí se tramitan las aguas minerales.

5.4.3. Comunidad de Madrid

En primer lugar, se debe acudir al Ayuntamiento antes del comienzo de las obras. Este organismo debe concederle una licencia de obra. Es posible que esta licencia venga condicionada a la autorización previa de la Confederación Hidrográfica del Tajo y de la Comunidad de Madrid. El modelo a presentar en la Comunidad de Madrid se recoge en https://www.bocm.es/boletin/CM_Orden_BOCM/2017/02/14/BOCM-20170214-10.PDF.

A continuación, se debe obtener la autorización de extracción de agua subterránea por parte de la Confederación Hidrográfica del Tajo. La Confederación Hidrográfica del Tajo dispone en su página web, en el apartado de trámites, distintos modelos de solicitud de aprovechamientos de agua, así como las instrucciones para su cumplimentación. Para aprovechamientos de aguas subterráneas utilizadas en la misma finca o predio en la que se encuentra la captación, y con un volumen anual no mayor de 7000 m³, la solicitud de inscripción en la sección B del registro de aguas se localiza actualmente en <https://www.chtajo.es/documents/33827/811218/Formulario+INSCRIPCION+C3%93N+Seccion+B+-MODIFICADO.pdf/8ae88bc6-cec5-6ec5-0457-7d177a0892d6?t=1764885127437>. Para realizar la inscripción es necesario que las obras de alumbramiento se encuentren ejecutadas, sin perjuicio de las autorizaciones que en su caso sean necesarias. Si el pozo se ubica en zona de policía de cauces, deberá contar con autorización, según el artículo 87.4 del RDPH. Para ello existe la siguiente solicitud <https://www.chtajo.es/documents/33827/691461/ZP1.+CONSTRUCCION+C3%93N+DE+CAPTACIONES+DE+AGUAS+SUBTERRANEO+C3%93N+NEAS+%28POZOS%2C+SONDEOS%29+DE+INSCRIPCION+EN+LA+SECCION+B.pdf/3ad3a6af-6603-9edd-dd0d-ed6d22448e7f?t=1756820641526>.

Si el volumen demandado es superior a 7.000 m³/año o el uso se realiza fuera del predio, existen diferentes solicitudes de concesión de aguas en función del uso previsto (regadío, ganadero, abastecimiento, hidroeléctrico, acuicultura, industrial, etc.).

Una vez finalizadas las obras de alumbramiento y antes de iniciar la explotación del pozo, se deberá solicitar la inscripción en el Libro Registro de Aguas de la Confederación Hidrográfica del Tajo. Las aguas del aprovechamiento se podrán utilizar exclusivamente en el predio o finca registral donde se alumbren o afloren. Extraer las aguas sin declararlas previamente podrá ser objeto de sanción. Si es en zona de policía deberá contar con la autorización. Si el volumen demandado es superior a 7.000 m³/año o fuera del predio, antes de realizar la perforación, tendrá que solicitar la oportuna concesión de aguas subterráneas.

5.4.4. Comunidad Valenciana

En la tabla 5.1 se indican las solicitudes y documentación que son actualmente necesarias para realizar un pozo de aguas subterráneas en un término municipal de la Comunidad Valenciana. Son tres las administraciones a las que el promotor de las obras debe pedir permiso para la construcción de un pozo: ayuntamiento en donde se localiza el pozo, organismo competente de la demarcación hi-

drográfica correspondiente, y el Servicio Territorial de Industria, Energía y Minas (hay uno para cada dirección territorial provincial, actualmente pertenecientes a la Consejería de Economía Sostenible, Sectores Productivos, Comercio y Trabajo). Para el ayuntamiento solo hay un trámite administrativo, que es la solicitud de licencia de obra, con la presentación de la documentación referida en la tabla 5.1. En el caso de confederación y el Servicio Territorial de Industria, Energía y Minas pueden ser uno o varios los trámites necesarios.

	Hasta 7000 m³ de explotación anual, acuífero en buen estado cuantitativo o químico	Más de 7000 m³ de explotación anual
Ayuntamiento	Solicitud licencia de obras Proyecto básico visado: Memoria descriptiva de la obra; cuadros resumen; documentación fotográfica; planos y anejos Anexo II de la Ordenanza Reguladora de Obras de Edificación y Actividades	
Organismo de cuenca	Memoria técnica Memoria técnica: justificación de necesidades hídricas; croquis, descripción y justificación de las obras; planos	Proyecto de investigación Informe final de obra Proyecto de concesión Proyecto de Investigación Memoria explicativa, planos y presupuesto - Art. 179 RDPH) Proyecto de concesión: Justificación de necesidades hídricas; propuesta de perímetro de protección; descripción y justificación de las obras; planos; estudios complementarios a petición de la Administración - Art. 106 RDPH
Servicio Territorial de Industria, Energía y Minas	Solicitud de autorización de obra subterránea (y pago de tasas de obra subterránea e inspección de policía minera), certificado de disponibilidad de terrenos, autorización de investigación de aguas subterráneas de la Confederación Hidrográfica correspondiente, nombramiento de la Dirección Facultativa/Coordinador de Seguridad, documento de aceptación por el Coordinador de Seguridad Proyecto de obra Empresa contratista, fecha de inicio de las obras, documento de seguridad particularizado a la obra Certificado final de obra Proyecto de obras de sondeos para aguas subterráneas: Memoria; planos; pliego de condiciones; relación de equipos y maquinaria; estudio básico de seguridad y salud; presupuesto Estudio de impacto ambiental simplificado si la obra está en espacios de la Red Natura 2000, o la perforación se realiza con plataforma fija, sin equipo de perforación autoportante, o con empleo de lodos de componentes no naturales	

Tabla 5.1. Trámites y solicitudes requeridos para legalizar un sondeo según el volumen de explotación anual en la Comunidad Valenciana, aplicables de forma muy similar en la mayoría de las demarcaciones. Nota: Un único proyecto, que recoge todo el contenido incluido en el RDPH, y en el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera, vale tanto para la licencia de obras como para proyecto de investigación en el organismo de cuenca o proyecto de obra ante el Servicio Territorial de Industria, Energía y Minas.

5.4.5. Comunidad Autónoma de Andalucía

En el libro recientemente publicado por Peinado (2019) se recogen, entre otros puntos de construcción y clausura de sondeos en la provincia de Granada, los trámites necesarios para la legalización de un sondeo en dicha provincia, siendo estos los siguientes:

1. Para realizar la perforación es necesario tener el otorgamiento de la Administración competente en materia de aguas. Este organismo es la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir o la del Guadiana, dependientes ambas del Estado en las cuencas intercomunitarias, o la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas, dependiente de la Junta de Andalucía en las cuencas intracomunitarias. Se debe presentar una solicitud de concesión de aguas, acompañada

de un proyecto técnico, junto con la documentación acreditativa. Se publicará en el Boletín Oficial de la Provincia la concesión de aguas públicas solicitada. Si el caudal es superior a 4 l/s se publicará, además, en dicho boletín, la competencia de proyectos. Finalmente, debe publicarse también en el Boletín Oficial de la Provincia el otorgamiento. Se deben liquidar unas tasas por tramitación del expediente, y además se debe abonar el importe de cada una de las publicaciones anteriores.

2. Cuando se trate de aguas de consumo público se debe presentar un informe sanitario sobre la idoneidad de la captación y la calificación sanitaria de las aguas y los mínimos precisos para su potabilización. El organismo competente es la Delegación Provincial de la Consejería de Salud de la Junta de Andalucía.
3. Antes de realizar la perforación es necesario disponer de la autorización para obras de captación de aguas subterráneas. El organismo competente es la Delegación Provincial de Minas, dependiente de la Junta de Andalucía. Se debe presentar una solicitud, acompañada de un proyecto técnico, junto con la documentación acreditativa y la liquidación de las tasas conforme al modelo 046.
4. Una vez concluida la perforación es necesario, para extraer el agua, equiparla y conectarla a una fuente de suministro de energía. Esta conexión puede ser a una línea eléctrica, a placas solares, a un aerogenerador o a un grupo electrógeno. Es necesario disponer de la autorización de puesta en servicio de la captación. El organismo competente es igualmente la Delegación Provincial de Minas. Se debe presentar una solicitud, acompañada de un proyecto técnico, junto con la documentación acreditativa y liquidar unas tasas conforme al modelo 046. Se debe hacer la presentación telemática del boletín de instalación a través de la aplicación denominada tramitador HAPR.

6. Propuesta de contenidos de los documentos técnicos necesarios para la perforación de un sondeo

Un sondeo de investigación o explotación de aguas subterráneas es una obra de ingeniería hidráulica que ha de basarse en un proyecto técnico. Por ello, en esta guía se quiere resaltar la idoneidad técnica y la obligación legal de presentar para toda obra de captación de aguas subterráneas, con independencia de la explotación prevista, un proyecto en el que han de estar reflejados un mínimo de apartados que permitan conocer la ubicación de la obra, sus características físicas, sus objetivos, el contexto hidrogeológico, las medidas de seguridad y salud, tiempo previsto de ejecución, etc.

El proyecto de captación debe regirse por los artículos 179, 180 y 184 del RDPH sobre los proyectos de investigación y concesión de aguas subterráneas y su desarrollo en los planes hidrológicos de cuenca. En las Islas Baleares y la Agencia Catalana del Agua se especifica la documentación a aportar para todas las captaciones, incluidas aquellas con una explotación prevista inferior a 7.000 m³/año. En algunas demarcaciones no se da una instrucción clara para dichas explotaciones.

Teniendo en cuenta los artículos 2, apartado 2, y el 117 de la Ley de Minas de 1973, la definición de "técnica minera" del artículo 1.º 4 del Reglamento General de la Minería (R.D. 2857/1978), el artículo 2 de la Directiva 92/91/CEE y el artículo 7.2 de la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales, se concluye que las medidas de seguridad y salud aplicables a la construcción de las captaciones de aguas subterráneas deben regirse por lo dispuesto en la Ley de Prevención de Riesgos Laborales y sus decretos de desarrollo. En consecuencia, no resulta de aplicación el Reglamento de Normas Básicas de Seguridad Minera ni está justificada la intervención de la autoridad minera.

El proyecto de obra, basado en el correspondiente estudio hidrogeológico, y donde, aparte de lo especificado en la reglamentación citada (localización detallada, justificación de la disponibilidad de los terrenos, caudal de explotación, destino del agua captada, existencia de otros puntos de agua próximos, plan de seguridad y salud, etc.), deberían figurar, expresamente, el promotor de las obras, el nombre del director facultativo, el sistema de perforación, el esquema constructivo, la columna litológica prevista, el

caudal de explotación previsto y descripción del procedimiento de clausura en caso de ser negativo. Esto deberá hacerse en los diferentes apartados del proyecto.

El director facultativo de la perforación debe ser un técnico con la capacidad legal y formativa adecuada. El director facultativo debe disponer del estudio hidrogeológico, el cual define el punto más adecuado de perforación, la serie litológica prevista a atravesar o los niveles permeables a captar. Asimismo el director facultativo deberá dirigir la obra, gestionar y supervisar las labores durante y después de la ejecución de la perforación (desarrollo, aforo y ensayo de bombeo), emitir un informe final de obra y certificar el correcto sellado en caso de que el sondeo sea negativo. Conviene incidir en la necesidad de la exigencia de que en los certificados de fin de obra se especifique muy claramente, y recogido con fotografías, el procedimiento de sellado del sondeo, en el caso de que la captación sea negativa.

Habría que diferenciar entre el contenido de un proyecto técnico relacionado con una obra de una captación de abastecimiento o de riego de gran volumen, que debe cumplir con todos los apartados recogidos en la tabla 6.1, y la memoria que debe presentar un particular para que se pueda valorar una solicitud de una pequeña captación a construir. En este último caso, se deberían pedir documentos sencillos, aplicando el criterio técnico. Con independencia de las dimensiones de la captación, y aunque no es un documento necesario en muchas demarcaciones, se recomienda realizar ensayos de bombeo con recuperación (ver capítulo 7.6), que estén acompañados de un informe interpretativo en el que figuren los parámetros hidráulicos deducidos y el caudal de explotación recomendado. En la tabla 6.1 se presenta una propuesta de índice más detallado que el que se da en la tabla de los documentos a presentar sobre el proyecto de obra.

PROYECTO TÉCNICO DE UN SONDEO			Opcionalidad
DOCUMENTO N.º 1	MEMORIA	1. Datos básicos	Necesario. Puede estar resumida en una tabla, ficha o documento sencillo.
		2. Objeto del proyecto	
		3. Necesidades hídricas	
		4. Características de la obra	4.1. Ubicación y acondicionamiento: Necesario. Simplificar (coordenadas).
			4.2. Sistemas y diámetros de perforación: Necesario. Formato ficha.
			4.3. Acondicionamiento: Opcional en pequeñas captaciones. La Administración informará de su necesidad.
			4.4. Ensayos de bombeo: Adaptar en función del volumen a extraer. La Administración informará de su necesidad.
			4.5. Desarrollo del sondeo: Opcional en pequeñas captaciones. La Administración informará de su necesidad.
		5. Procedimiento de cierre o clausura	Necesario.
		6. Plazo de ejecución y Empresa perforadora	Necesario.
		7. Presupuesto	Necesario para la autoridad minera. Puede ser incluido como un documento aparte.
		8. Clasificación del contratista	Opcional en pequeñas captaciones.

PROYECTO TÉCNICO DE UN SONDEO			Opcionalidad
DOCUMENTO N.º 1	ANEJOS	A1. Estudio geológico-hidrogeológico	Necesario.
		A2. Justificación de precios (costes directos e indirectos)	Opcional en pequeñas captaciones.
		A3. Plan de obra	Necesario.
		A4. Estudio básico de Seguridad y Salud	Necesario. Puede ser incluido como un documento aparte.
DOCUMENTO N.º 2	PLANOS	M1. Mapa de situación	Necesario. Sencillo.
		M2. Mapa parcelario	Necesario. Hay que decir parcela y polígono, efectivamente para aportar títulos de propiedad y (o autorización del dueño).
		M3. Mapa geológico/hidrogeológico	Necesario (la Administración podría considerarlo opcional en función de los medios que disponga).
		M4. Esquema del sondeo	Necesario.
		M5. Columna litológica	Necesario (si no está incluida en el esquema del sondeo).
		M6. Esquema instalación electromecánica	Opcional, aunque hay Administraciones que sí lo piden.
DOCUMENTO N.º 3	PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS PARTICULARES	PT1. Definición y alcance del pliego	Necesario (la Administración podría considerarlo opcional en función del tamaño de la captación).
		PT2. Normativa	
		PT3. Descripción de la obra	
		PT4. Condiciones que deben cumplir los materiales	
		PT5. Condiciones que debe cumplir la maquinaria	
		PT6. Ejecución de las obras	
		PT7. Medición de las obras	
		PT8. Abono de las obras	
		PT9. Disposiciones generales	
DOCUMENTOS QUE PUEDEN SER INCLUIDOS	PRESUPUESTO	PR1. Mediciones	Esta Información es necesaria, pero puede darse en un documento aparte o en los documentos anteriores.
		PR2. Cuadros de precios	
		PR3. Presupuesto general	
	ESTUDIO DE GESTIÓN DE RESIDUOS		Esta Información es necesaria, pero puede darse en un documento aparte o en los documentos anteriores.
	DOCUMENTO DE SEGURIDAD Y SALUD		Esta Información es necesaria, pero puede darse en un documento aparte o en los documentos anteriores.
	ESTUDIO DE AFECCIONES MEDIOAMBIENTALES		Necesario según la normativa aplicable.

Tabla 6.1. Propuesta de índice del proyecto técnico de un sondeo.

DOCUMENTO N.º 1: MEMORIA Y ANEJOS

MEMORIA

La memoria es el documento explicativo en el que se relacionan las principales características de la obra. Debería tener como mínimo los siguientes contenidos:

1. Datos básicos

En este apartado se indicará el solicitante (persona física, agrupación, entidad, etc.) que demanda la ejecución de la obra y los motivos de esta solicitud.

2. Objeto del proyecto

Se explicará el motivo por el que se requiere la ejecución de la obra (satisfacer una demanda; investigación; mejora o renovación de las instalaciones de explotación, etc.).

3. Necesidades hídricas (demanda)

Este apartado deberá analizar (si procede) el sistema ya existente de explotación y las necesidades hídricas que debe satisfacer la obra proyectada (estimación mediante dotaciones de riego, consumos por habitante, demandas industriales específicas, etc.).

4. Características de la obra

4.1. Ubicación y obras de acondicionamiento previas

Se indicará la ubicación de la obra (término municipal, paraje, parcela, polígono, coordenadas UTM, cota...) y se especificará claramente la ruta de acceso al punto de perforación (carreteras, desvíos...). De igual manera se indicará si es necesario acondicionar los caminos de acceso, así como la zona de obras (allanado, deforestación, vallado...), para que tenga una superficie libre adecuada para la correcta instalación de la maquinaria, acopio de material, movilidad de vehículos, etc. También se hará referencia a cualquier elemento físico que por su proximidad pueda condicionar la ejecución de la obra: edificaciones, líneas eléctricas, caminos, carreteras, líneas férreas, labores mineras, presencia de otras captaciones o puntos de agua, etc. Deberá acreditarse, también, la propiedad de los terrenos en los que se va a realizar la perforación mediante certificado del Registro de la Propiedad o por la escritura de propiedad con nota simple registral expedida en fecha actual. Si el promotor no es el propietario deberá presentar autorización del mismo para la ejecución de la obra.

4.2. Sistemas y diámetros de perforación

Se indicará el método de perforación propuesto (percusión, rotopercusión directa, rotopercusión con circulación inversa,...) y se establecerán los diámetros y profundidades esperadas de perforación de la obra.

4.3. Acondicionamiento

Se indicará el tipo de tubería prevista (PVC, acero...), sus diámetros y espesores, sus características en los tramos de filtro, profundidades de instalación, así como el sistema empleado para su introducción en el sondeo. Igualmente se preverá la posibilidad de instalar prefiltro entre la entubación y las paredes del sondeo, el tipo de material empleado (grava, otros), la cementación de tramos determinados de la perforación, así como la cementación de la parte superior de la misma y las características del sellado superficial (cementación de los metros más superficiales, ejecución de losa de hormigón en la boca del sondeo, etc.).

4.4. Ensayo de bombeo

En el proyecto técnico del sondeo, se preverá la realización de un ensayo de bombeo. Para ello, se considerará un determinado tipo de bomba (capacidad de bombeo) y la profundidad aproximada a la

que deberá instalarse en función de los condicionantes hidrogeológicos de la zona (profundidad del nivel piezométrico, transmisividad, profundidad final de la obra, diámetros definitivos de entubación, etc.). A veces las administraciones competentes piden que en el proyecto constructivo se recoja un diseño previo del equipamiento electromecánico necesario para la extracción del agua subterránea.

4.5. Desarrollo del sondeo

Si tras la realización del ensayo de bombeo la dirección de obra estimara conveniente el desarrollo de la captación, se llevaría a cabo esta operación. Seguidamente se realizaría un nuevo ensayo de bombeo en las mismas condiciones que el primero, para determinar el caudal final de explotación.

5. Procedimiento de cierre o sellado del sondeo

Una vez finalizada la obra, se preverá un cierre adecuado del sondeo, así como las medidas de seguridad necesarias para evitar daños a terceros o al medio ambiente. En el caso de una investigación que resulte negativa o que no interese su explotación, se deberá presentar en el proyecto una propuesta de sellado de la perforación y restitución del terreno a sus condiciones iniciales, lo que garantiza que se va a sellar correctamente dicho sondeo.

6. Plazo de ejecución y empresa perforadora

Se establecerá el tiempo (en días) previsto para la ejecución de la obra. En el anejo correspondiente se justificará la duración del plazo de ejecución y se incluirá un diagrama de Gantt del desarrollo de las actividades. Asimismo, siempre que se conozca se indicará el nombre de la empresa perforadora.

7. Presupuesto

Se indicará el coste de ejecución de la obra al que se aplicará el correspondiente Impuesto sobre el Valor Añadido (I.V.A.). En el anejo correspondiente se desarrollará el mismo en función de los cuadros de precios aplicados a las unidades de obra y las mediciones previstas. Se podrán describir: (i) las mediciones específicas de cada una de las unidades de obra que son necesarias para la ejecución del sondeo proyectado, y (ii) el cuadro de precios aplicables para la valoración de las unidades de obra. En función de los precios unitarios establecidos en los cuadros anteriores se calculará el presupuesto general de ejecución de la obra proyectada, incluido el de abandono de las obras. En ocasiones el presupuesto se incluye como un documento aparte fuera de la memoria.

8. Clasificación del contratista

Se establecerá la clasificación que deberá tener el contratista en función de la normativa legal vigente y de las características y coste de la obra.

ANEJOS

La memoria vendrá acompañada de los siguientes anejos:

A1. Estudio geológico-hidrogeológico

Se incluirá un estudio geológico-hidrogeológico realizado por técnico competente. Se incorporará la columna litológica que se prevé atravesar, con la indicación del acuífero objetivo y la existencia o no de acuíferos superpuestos, especificando la piezometría esperada en todos ellos, hidrodinámica general, la calidad del agua en cada uno, un inventario de puntos cercanos y las medidas a adoptar para evitar conexiones indeseadas. Se incluirán también las posibles testificaciones a realizar durante o al final de la obra.

A2. Justificación de precios (justificación de costes directos e indirectos)

En este apartado se incluirán tablas con el listado de las diferentes unidades de obra que sean de aplicación y sus precios unitarios.

A3. Plan de obra

Este anejo incluirá el diagrama de actividades del sondeo proyectado, en el que se indicarán los tiempos previstos y el coste de cada fase de ejecución de la obra (traslados y accesos, emplazamiento, perforación, acondicionamiento, aforo, desarrollo, cierre del sondeo, otros).

A4. Estudio básico de seguridad y salud (RD 1627/1997 de 24.10.97, BOE, nº 256 de 25.10.97 por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción)

Incorporará las disposiciones mínimas de seguridad y salud exigidas por la legislación vigente para todas las fases de ejecución de la obra concreta proyectada. Su objetivo será el de identificar y evaluar los riesgos laborales que pueden ser evitados señalando las medidas de prevención y protección que deban establecerse para ello. Igualmente, se identificarán y evaluarán los riesgos laborales que no pueden eliminarse, estableciendo las correspondientes medidas de prevención y protección al objeto de controlar y minimizar dichos riesgos. Este estudio básico de seguridad y salud fijará las directrices que deberá cumplir la empresa constructora (contratista) para redactar convenientemente el plan de seguridad y salud y así lograr los objetivos mínimos en el campo de la prevención de riesgos laborales. En dicho plan se analizarán, estudiarán, desarrollarán y complementarán las previsiones contenidas en este estudio, en función de su propio sistema de ejecución de obra. El plan de seguridad y salud permanecerá en la obra, donde además existirá, con fines de control y seguimiento del propio plan de seguridad y salud, un libro de incidencias.

DOCUMENTO N.º 2: PLANOS

M1. Mapa de situación

Se adjuntarán los mapas necesarios, a una escala adecuada, para identificar con claridad la posición y accesos al lugar de ejecución de la obra.

M2. Mapa parcelario

Deberá adjuntarse un mapa con la identificación catastral de la parcela o parcelas en las que se realiza la obra.

M3. Mapa geológico e hidrogeológico

Se adjuntarán mapas geológicos o hidrogeológicos, a escala adecuada, en los que se indicará la posición de la perforación proyectada y la de los puntos de agua existentes en el entorno de la captación proyectada.

M4. Esquema del sondeo

Será necesario incluir un esquema constructivo del sondeo proyectado en el que queden claramente especificados, al menos, la profundidad de la obra y los diámetros de perforación y entubación, así como el tipo y edad de los materiales que se prevé atravesar y la profundidad prevista del nivel piezométrico. Para este apartado puede resultar muy práctica la aplicación informática CROQUIS, promovida por el Ciclo Hídrico de la Diputación de Alicante, de distribución gratuita (<https://ciclohidrico.com/download/croquis-2-0/>).

M5. Columna litológica prevista

En muchas ocasiones esta columna se recoge en el esquema constructivo del sondeo, con la ayuda de la aplicación informática indicada.

M6. Esquema de instalación electromecánica prevista para la extracción del agua subterránea.

Se establece la potencia y tipo de bomba así como el suministro eléctrico en baja tensión previsto. Con los datos que se obtengan en el aforo podrán efectuarse los cálculos y diseño definitivo.

DOCUMENTO N.º 3: PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS PARTICULARES

PT1. Definición y alcance del pliego

El pliego de condiciones servirá como documento contractual de la obra.

PT2. Normativa

Se especificará la normativa de aplicación en este tipo de obras.

PT3. Descripción de la obra

Se describirá el tipo de obra (sondeo vertical para captación de aguas subterráneas) de acuerdo con lo especificado en la memoria del proyecto. Se indicará, no obstante, que tanto los diámetros y profundidades que en ella se establecen como otras características o fases de la perforación podrán ser modificadas por la dirección de obra, si esta lo considera necesario para la correcta ejecución de la misma, como consecuencia de las características geológicas de los terrenos que se estén atravesando.

PT4. Condiciones que deben cumplir los materiales

En este apartado se especificarán las condiciones que deberán cumplir los materiales empleados en la ejecución de la obra (tuberías, cemento, bentonita, polímeros, lodos, cierres, ácidos, colmatantes...).

PT5. Condiciones que debe cumplir la maquinaria

En este apartado se especificarán las características técnicas de la maquinaria de perforación (máquina de percusión, sonda rotativa...).

PT6. Ejecución de las obras e instalaciones

Se especificará el plazo de ejecución de las obras (acorde con lo establecido en la memoria), el sistema de perforación y se indicarán las cementaciones previstas, el ensayo de bombeo, los desarrollos y desviaciones máximas admitidas, así como otras labores que lleven a la correcta ejecución de la obra. Igualmente se fijará la periodicidad de la toma de muestras.

PT7. Medición de las obras e instalaciones

En este apartado se especificará lo que se establece como metro lineal de perforación, de entubación, de cementación, etc.

PT8. Abono de las obras e instalaciones

Se especificarán la forma de abono de la obra al contratista, la recepción de la obra y el plazo de garantía de la misma.

PT9. Disposiciones generales

Dentro de este apartado se especificarán las funciones y obligaciones tanto de la dirección de obra como de la empresa contratista. A la primera le corresponde la supervisión de los trabajos y tiene la facultad, si lo considera oportuno, de modificar el proyecto. Por su parte, será responsabilidad de la empresa contratista, el mantenimiento de la seguridad en la obra y su entorno de actuación durante la realización de la misma. A no ser que se especifique contractualmente, suele ser el promotor el encargado de obtener los permisos y licencias oficiales o particulares que se requieran para la ejecución del trabajo, siendo de su cuenta los gastos que se deriven de derechos, indemnizaciones, daños a terceros y trabajos de acceso a los emplazamientos.

Por último, se quiere indicar la documentación que deben aportar las empresas de perforación antes del inicio de la obra. En primer lugar, deben solicitar al contratante, con anterioridad a la prestación

de sus servicios, la acreditación de la autorización emitida por el organismo competente para la realización de los trabajos, debiendo ceñirse al contenido y limitaciones que en la misma se refieran. Los supuestos en los que las empresas o contratantes acometan cualquier trabajo de perforación sin las autorizaciones pertinentes, o que incumplan con sus directrices, pueden acarrear sanciones tipificadas en el RDPH:

“Artículo 318

2. Los cómplices y encubridores podrán ser sancionados con multas que oscilarán entre el tercio y los dos tercios de las que correspondan a los autores de la infracción.”

“Artículo 325. Responsables.

Las obligaciones de reponer las cosas a su primitivo estado y las de indemnizar daños serán exigibles de forma solidaria, en primer lugar, a los responsables directos, y, sucesiva y subsidiariamente, a los cómplices y encubridores.”

“Artículo 326 bis. Valoración de daños al dominio público hidráulico en los supuestos en que no se vea afectada la calidad del agua.

1. La valoración de los daños por extracción ilegal de agua se realizará teniendo en cuenta los siguientes criterios...”

Otra información a incluir en el proyecto es el estudio de gestión de residuos, que se puede añadir como un documento adicional o como un anexo. Además, si la normativa aplicable lo requiere, es necesario incluir un estudio de afecciones medioambientales y un documento de seguridad y salud.

7. Construcción y evaluación cuantitativa y cualitativa del pozo

7.1. Condicionantes a considerar en la ubicación de un sondeo

La ubicación de un sondeo viene determinada por una serie de condicionantes en la localización de las captaciones, como son: la disponibilidad de terrenos, objetivos perseguidos, criterios hidrogeológicos, accesos, posibles afecciones, legislación y asuntos presupuestarios (entronque con línea eléctrica, distancia a depósitos o embalses, etc.). Además, y descontando también la localización en una zona inundable, debe considerarse la existencia en el entorno de algún foco potencial de contaminación.

Según el RDPH, en los artículos 243, 243 bis y 243 ter, los perímetros de protección deben proteger una captación para abastecimiento a poblaciones o de zonas de especial interés ecológico, paisajístico, cultural o económico. Así mismo, el artículo 243 quater establece que el proceso de delimitación del perímetro de protección lo debe iniciar el Organismo de Cuenca y lo debe delimitar la Junta de Gobierno, con informe previo del Consejo del Agua. Por otro lado, la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH), publicada en la Orden ARM/2656/2008, define como zonas protegidas aquellas zonas en las que se realiza una captación de agua destinada a consumo humano, siempre que proporcione un volumen medio de al menos 10 m³/día o se abastezca a más de 50 personas, así como los perímetros de protección delimitados. Según esta definición, una zona protegida puede englobar más de un perímetro de protección. Para más información sobre la definición de los perímetros de protección se remite al lector a la Guía para el diseño y dimensionamiento de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano (PPCSb) Reglamento del Dominio Público Hidráulico R.D. 849/1986 – R.D. 665/2023 (MITECO, 2025b).

En la presente guía se quiere destacar que, de forma general, deben existir distancias mínimas a: edificios, fosas sépticas con distintos tipos de drenaje, conducciones de aguas residuales y aplica-

ción de las mismas, tanques de almacenamiento de hidrocarburos y otras sustancias, enterrados o no, actividades ganaderas en función del número de animales y su acondicionamiento, aprovechamientos geotérmicos, zonas industriales, puntos de vertido de estaciones depuradoras, cementerios, viviendas próximas con pozos ciegos, etc. Es necesario, por tanto, considerar en la elaboración del proyecto de captación estas circunstancias, realizándose un inventario de focos potenciales de contaminación en, al menos, 1 km de radio respecto al centro del pozo cuando se explotan caudales pequeños, extendiendo esta distancia en el caso de caudales de explotación importantes y en los pozos dedicados al abastecimiento de la población. A modo de ejemplo, la tabla 7.1 muestra las distancias mínimas establecidas en las normas de Minnesota (Minnesota Department of Health, 2011).

Actividad	Distancia (m)		
	A*	B*	C*
Edificios sin subterráneos y viviendas aisladas **	3	3	3
Tanques de propano, conducciones de gas y líneas eléctricas.	3	3	3
Recintos para animales (hasta 1 UGM). Tanques de combustible sobre impermeable (hasta 3 m³). Tubería de aguas residuales, en plástico o acero aprobado, sirviendo a no más de 2 viviendas. Piscinas. Balsas de más de 1 m de profundidad.	6	12	18
Intercambiadores verticales de calor. Lagos. Corrientes de agua. Balsas. Ríos.	10	20	30
Colectores de residuales de material no aprobado o desconocido, sirviendo a un máximo de 2 viviendas. Intercambiadores de calor horizontales. Tanques de almacenamiento subterráneo de menos de 3 m³. Fosa séptica o tanque de retención. Sistema de dispersión o drenaje para menos de 3 m³/d. Comedero de animales entre 1 y 300 UGM. Estabulación de animales entre 1 y 20 UGM. Cementerio. Pozo en desuso.	15	30	45
Letrina. Pozo de drenaje o de infiltración y de fosa séptica individual.	25	50	75
Comedero de más de 300 UGM. Conducción de petróleo o similares. Sistema de dispersión de residuales hasta 10 m³/d (50 hab-eq).	30	60	90
Depósitos de petróleo, agroquímicos, abono líquido y sustancias peligrosas, sobre impermeable. Estabulación de ganado de más de 20 UGM. Sistemas de dispersión de residuales entre 10 y 30 m³/d.	60	120	180
Depósitos de petróleo, agroquímicos, abono líquido y sustancias peligrosas, sin solera impermeable. Sistema de dispersión de efluente en suelo de más de 30 m³/d. Depósitos enterrados de combustible de más de 3 m³.	100	200	300

Tabla 7.1. Distancia mínima (m) de la captación a posibles focos de contaminación.

UGM = Unidad de Ganado Mayor. Se utiliza para evaluar el tamaño y el impacto de una explotación ganadera, convirtiendo diferentes tipos de animales a una unidad de referencia común (generalmente del tamaño de una vaca adulta).

1 hab-eq (habitante equivalente) = unidad de medida que representa la carga de contaminación orgánica de las aguas residuales, equivalente a la producida por una persona en un hogar estándar y se define como una demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) de 60 g de oxígeno por día. Normas de Minnesota (Minnesota Department of Health, 2011).

Resulta imprescindible en estos casos una evaluación hidrogeológica detallada que cuantifique el riesgo de contaminación, mediante un contrastado modelo hidrogeológico y aplicando diferentes metodologías, como puede ser la de Rehse-Bolsenkötter (Rehse, 1977; Bolsenkötter et al., 1984), o programas informáticos que estimen el tiempo de tránsito de un contaminante hasta la llegada al pozo (e.g. PEPOTE -Perímetros de Protección, distribuido gratuitamente por el Área de Ciclo Hídrico de la Diputación de Alicante: <https://ciclohídrico.com/download/delimitacion-de-perimetros-de-proteccion-para-captaciones-de-aguas-subterraneas/pepote/>). En la Guía para el diseño y dimensionamiento de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano (PPCSb) Reglamento del Dominio Público Hidráulico R.D. 849/1986 – R.D. 665/2023 (MITECO, 2025b) se puede consultar el estudio que en cada caso procede realizar, en función de la utilización del agua captada, de las características del acuífero, de la captación, y del foco potencialmente contaminante.

Las normas revisadas en el capítulo 5 establecen unas recomendaciones genéricas sobre la ubicación topográfica del pozo: aguas arriba de cualquier fuente de contaminación, teniendo en cuenta la posible inversión de flujo provocada por el cono de bombeo, etc. Además, se recomienda una sobre-elevación mínima de la tubería de cabeza del pozo de 30 cm sobre la solera. En general, se prohíbe la ubicación del pozo en zona inundable y en su defecto, se impone una sobreelevación de 0,50 m por encima del máximo nivel de las aguas y unas condiciones de estanqueidad más estrictas (más información en el epígrafe 7.7). Existen además otras restricciones de seguridad (edificaciones por riesgo de subsidencia, a líneas eléctricas, etc.). Todos estos condicionantes fijarán las características físicas de la captación (profundidad, diámetros de perforación y acondicionamiento).

Se enumeran a continuación ejemplos reales de contaminación en captaciones causadas por una mala ubicación según comunicación personal de Juan Antonio Hernández Bravo, jefe de la Unidad de Recursos Hídricos de la Diputación de Alicante:

- Acopio de purines para abono agrícola en zonas próximas a una captación. Si están cerca de tramos permeables la infiltración directa de lixiviados hace que lleguen con facilidad al pozo, ya sea porque este tiene como objetivo dichos tramos permeables o porque los atraviese en su tramo más superficial y no presente una cementación adecuada en los mismos. Igualmente, si el acopio de estos materiales se produce en un suelo poco permeable, puede causar contaminación si pasa cerca algún reguero o barranco que aguas abajo atraviese tramos permeables conectados con la captación.
- Acopio de otros restos orgánicos en proximidades de captación, como por ejemplo algas de retirada de playa para generar biomasa.
- Vertido de estación depuradora de aguas residuales (EDAR) en regueros, barrancos o ríos conectados aguas abajo con tramos permeables atravesados por la captación.
- Fugas de la red de alcantarillado de núcleos urbanos en terrenos detríticos captados por drenes o pozos.
- Fugas de alcantarillado o pozos ciegos de urbanizaciones localizadas sobre afloramientos permeables, especialmente en montañas formadas por afloramientos carbonatados.
- Contaminación de manantiales por depósitos de combustible antiguos en terrenos carbonatados.

Además, hay que añadir la posible contaminación por cementerios y gasolineras.

7.2. Control de perforación, testificación y auscultación de sondeos

7.2.1. Conceptos generales

La perforación de un sondeo constituye siempre una oportunidad única de acceso a información real del subsuelo. A veces, la ejecución de un sondeo es la culminación de muchas horas de estudio e investigación por métodos indirectos, por tanto, es muy importante contar con los equipos técnicos y humanos especializados que puedan extraer la máxima información posible.

Durante la fase de perforación de un sondeo de captación de aguas subterráneas el equipo encargado de la construcción y los expertos en hidrogeología hacen una serie de observaciones y de medidas que son esenciales para conseguir un correcto diseño final del acabado del sondeo, para tener una primera idea de la calidad del agua y de la posición de los niveles productivos y para mejorar el conocimiento geológico e hidrogeológico de las formaciones perforadas.

De la adecuada combinación de las observaciones realizadas por los sondistas, y de la información generada por los especialistas en hidrogeología y de la testificación geológica y geofísica depende el éxito del diseño final de un sondeo para la captación de agua subterránea, dado que lo previsto en el proyecto inicial y lo que resulta tras la perforación no suele coincidir.

Se considera conveniente definir algunos de los conceptos empleados en este apartado. Así, a los distintos procedimientos empleados para la testificación geológica y geofísica de un sondeo se les conoce como testificación de sondeos.

La testificación geológica incluye el muestreo y el análisis del detritus o ripio generado durante la perforación y de los testigos del sondeo, cuando se perforan sondeos con recuperación de testigo. Por su parte, la testificación geofísica consiste en el registro y análisis de mediciones de las propiedades físicas de la formación geológica perforada y del fluido que contiene el interior del sondeo. Estos registros se realizan con sondas geofísicas que acceden al interior del sondeo y realizan la toma de datos de forma generalmente continua. La representación gráfica de estos registros se denomina diagrfías o perfiles del pozo.

La interpretación de estos registros puede proporcionar información sobre:

- Litologías: identificación y ubicación de formaciones geológicas, buzamiento de los estratos, tipo de contactos litológicos, permeabilidad y porosidad, densidad, resistividad, localización de zonas permeables, correlación de sondeos.
- Propiedades del fluido: calidad del agua, identificación de flujos.
- Aspectos constructivos: diámetro, desviación, azimuth, unión entre tuberías, grado de corrosión de la tubería, etc.

Por su parte, la auscultación de un sondeo consiste en la evaluación del acabado constructivo de un pozo mediante la realización de registros geofísicos. Se conoce genéricamente como testificación final de obra e incluye fundamentalmente registros que evalúan aspectos constructivos como los registros videográficos, verticalidad y diámetros del sondeo. También se pueden realizar otros registros más específicos según necesidades del proyecto como diagrfías para el control de la unión de la tubería o de las cementaciones, o de vídeo registro.

7.2.2. Control de la fase de ejecución

Durante la fase de perforación de un sondeo el equipo de perforación debe controlar tres aspectos fundamentales: a) la velocidad de avance de la perforación, b) las incidencias durante la fase de ejecución y c) el comportamiento del fluido y del nivel de agua en el interior del sondeo.

El control de la velocidad de avance de la perforación es de gran ayuda para reconstruir la columna litológica del sondeo. Hay que entender que la velocidad de avance depende de muchos factores como el sistema de perforación, la presión que se ejerce en la herramienta de corte y la profundidad del sondeo, entre otros. Sin embargo, las formaciones más duras suelen ser más difíciles de perforar que las formaciones blandas y hacen que cambie el ritmo de avance de la perforación. Por eso, los perfiles de sondeo en los que se enfrenta la velocidad de avance (normalmente medida en m/min) con la columna litológica son de gran utilidad.

Es necesario conocer todas las incidencias que se producen durante la construcción de un sondeo. Es esencial una comunicación fluida con el equipo humano encargado de la construcción de la perforación. La intercepción de horizontes con agua durante la perforación, y el aumento o la reducción del caudal que se extrae durante la perforación, el cambio en la humedad de las muestras, el color del agua de retorno, la presencia de tramos fracturados, las dificultades en la rotación de la sarta, la intercepción de cavidades kársticas y cualquier otro tipo de circunstancia debe quedar reflejada en el parte de perforación.

El control del nivel piezométrico del sondeo durante la fase de perforación es esencial. Cuando se puede conocer el descenso o el ascenso del nivel piezométrico de la perforación durante el avance de su construcción se consigue una información hidrogeológica muy valiosa. Asimismo, resulta de especial interés el poder realizar algunos ensayos hidráulicos durante la ejecución de un sondeo. Es el caso de los ensayos slug o de los clásicos ensayos de valvuleo, cuando se perfora a percusión. Estos ensayos permiten tener una idea aproximada de la permeabilidad de las formaciones perforadas, información que puede ser de especial interés para determinar si es necesario hacer un sondeo más o menos penetrante en una formación acuífera, con objeto de obtener un caudal determinado. Con toda esta información es posible establecer el diseño de la captación, la entubación, los tramos ciegos y los tramos de rejilla.

7.2.3. Testificación geológica

El reconocimiento de las muestras del detritus o ripio que se genera durante la perforación de los sondeos de captación de agua subterránea permite adquirir una valiosa información geológica, que debe ser interpretada durante el avance de la perforación. El análisis de esta información permitirá al especialista en hidrogeología conocer la necesidad de continuar la perforación o de detenerla, así como planificar un adecuado diseño constructivo de la captación, entre otras cuestiones.

Por defecto, cuando se utilizan técnicas de perforación destructivas, que es lo habitual al construir sondeos para la captación de aguas subterráneas, se recomienda muestrear un kilo de muestra del detritus por cada metro de avance de la perforación. Estas muestras se deben introducir en bolsas de plástico transparente, que deben ser guardadas, numeradas según profundidad, e identificadas. Es muy importante que las muestras queden protegidas de las inclemencias meteorológicas.

La descripción litológica de las muestras debe hacerse por profundidades y de forma sucinta. En primer lugar, se debe indicar el nombre del detritus o de la roca y su color, después sus características texturales, los componentes minerales más destacados y el tamaño del detritus. Si es posible se debe indicar la edad geológica de la formación perforada. Es recomendable utilizar las clasificaciones de rocas y de texturas más convencionales, así como una tabla de colores estándar, como es el caso de la tabla de Munsell. Asimismo, para distinguir dolomías de calizas en las perforaciones de rotopercusión directa, es conveniente usar ácido clorhídrico. Esta información es de interés si posteriormente se valora la acidificación del sondeo. También el ácido clorhídrico permite determinar la naturaleza del cemento de las areniscas compactas.

Si se pretenden hacer análisis granulométricos, paleontológicos, mineralógicos o de otro tipo, se deberá consultar con el laboratorio correspondiente la cantidad de muestra necesaria y el procedimiento de muestreo más adecuado.

En el caso de sondeos de investigación hidrogeológica con recuperación de testigo continuo, los testigos deben ser identificados y almacenados en cajas, que deben estar protegidas de las inclemencias meteorológicas.

7.2.4. Testificación geofísica

Con la testificación geofísica se pretende conocer, de forma indirecta, las características y los tipos de materiales perforados durante la construcción de un sondeo, así como algunas de las características físico-químicas del agua subterránea existente en las distintas formaciones geológicas atravesadas.

Los equipos de testificación geofísica básicos constan de los siguientes elementos:

1. Vehículo de transporte. Actualmente el tamaño de los equipos de prospección se ha reducido de forma notoria y ya pueden ser desplazados en un vehículo de no muy grandes dimensiones.
2. Generador eléctrico. Para suministrar electricidad a los diferentes componentes del equipo (cabrestante, monitores, cuadro de mandos, ordenadores, etc.).
3. Cabrestante y motor, también conocido como *winch*, en donde se encuentra enrollado el cable de acero con un conductor coaxial. Este cable es accionado mediante un motor con el que se puede regular la velocidad de ascenso y descenso de la sonda. Así mismo, permite conocer la profundidad a la que se encuentra la sonda en cada momento.
4. Equipo registrador o logger. Consiste en la unidad de comunicación y de adquisición de los datos proporcionados por las sondas geofísicas.
5. PC en el que se incluye el correspondiente software de control del *winch* y de adquisición y de procesado de datos geofísicos.
6. Sondas geofísicas. Estas están formadas por sensores, que pueden ser generadores y/o receptores de medidas de una o varias propiedades físicas y un convertidor analógico-digital de la señal captada.

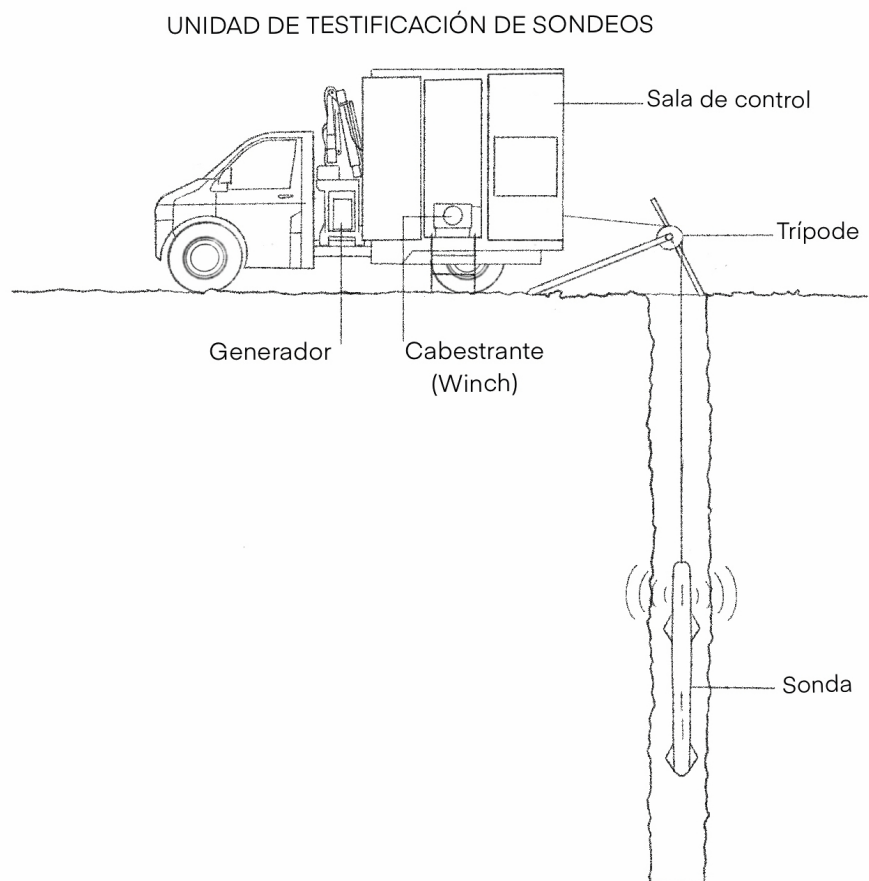


Figura 7.2.2. Principales elementos que componen una unidad de testificación geofísica de sondeos.

La selección de los diferentes tipos de registros geofísicos a realizar se debe estudiar de forma previa a la ejecución del sondeo, dado que su correcta aplicación depende de muchos parámetros como el diámetro de la perforación, la presencia de fluido, la existencia o no de entubado, de si este es metálico o no, etc. Por eso, la elaboración correcta del programa de testificación de un sondeo es esencial y debe obedecer a los objetivos para los que se diseña. En todo caso, se quiere hacer constar que la testificación geofísica debe partir de la testificación geológica previa de la columna del sondeo y de los datos del avance de la perforación facilitados por el equipo de perforación.

En la tabla 7.2.1 se describe y sintetiza la potencialidad de la mayoría de las diagrfías que se utilizan más frecuentemente en el campo de la hidrogeología. Para conocer adecuadamente el fundamento de los principales tipos de diagrfías empleadas en la testificación geofísica se recomienda la lectura de manuales específicos (Schlumberger, 1989; Hurst et al., 1992; Keary et al., 2002).

Información General	Tipo de registros	Diagrafía	Información detallada	Condicionante	Campo de Aplicación			
					Investigación	Construcción	Fin de Obra	Rehabilitación
Litología	Nuclear	Gamma Natural	Litología, contenido en arcilla, correlación	No requiere				
		Neutrón	Porosidad, fracturas, litología	No requiere				
		Gamma - Gamma	Densidad aparente, porosidad, litología	No requiere				
	Eléctricas	Resistividad Normal corta 16 "	Resistividad en zona invadida, litología, permeabilidad	Con fluido y pozo sin entubar				
		Resistividad Normal larga 64 "	Resistividad en zona no invadida, litología	Con fluido y pozo sin entubar				
		Potencial Espontáneo (SP)	Litología, identifica zonas acuíferas, anticipa calidad del agua	Con fluido y pozo sin entubar				
		Resistencia Monoeléctrica (SPR)	Litología, correlación	Con fluido y pozo sin entubar				
	Acústicas	Acoustic Televiewer	Litología de alta resolución, obtiene testigo continuo orientado, diámetro	Con fluido y pozo sin entubar				
			Litología, porosidad, fracturas, constantes elásticas, etc.	Con fluido y pozo sin entubar				
Propiedades del Fluido	Calidad del Agua	Temperatura	Gradiente térmico, zonas permeables, nivel del agua	Con fluido y entubado indiferente				
		Conductividad eléctrica	Calidad del fluido, zonas permeables, nivel del agua	Con fluido y entubado indiferente				
		Toma de Muestras	2 litros de agua de un punto concreto para análisis químico	Con fluido y entubado indiferente				
	Hidrodinámica	Flowmeter	Flujo en pozo, zonas permeables	Con fluido y entubado indiferente				

Información General	Tipo de registros	Diagrama	Información detallada	Condicionante	Campo de Aplicación			
					Investigación	Construcción	Fin de Obra	Rehabilitación
Aspectos Constructivos	Estructural	Calibre	Diámetro en perforación o tubería	No requiere				
		Desviación	Desviación con la vertical, orientación de la desviación	No requiere para verticalidad, sin tubería metálica para orientación (Azimut)				
	Tubería	Cámara de TV sumergible	Inspección directa del estado interior del sondeo	No requiere				

Tabla 7.2.1. Síntesis de los registros fundamentales de testificación en sondeos de captación de aguas subterráneas, información obtenida y campo de aplicación habitual.

Las técnicas de testificación geofísica en sondeos de captación de agua subterránea y los registros videográficos se pueden aplicar de forma previa a la ejecución de la captación, durante su construcción, una vez finalizada y durante el periodo de operación del sondeo.

1. Durante la **fase de investigación**, la realización de diagramas en sondeos existentes, en el entorno donde se va a realizar una perforación, permite correlacionar la información geológica, mejorando el conocimiento de la geometría de los acuíferos, conocer las características físico-químicas del agua subterránea, identificar las zonas más productivas en profundidad e incluso conocer el comportamiento del entubado de los sondeos con el paso del tiempo frente al agua de las formaciones acuíferas.

2. En la **fase de construcción** del sondeo, la testificación geofísica combinada con la testificación geológica debe ser empleada para definir el orden de entubación del sondeo, es decir, para conocer a qué profundidades se deben colocar los tramos ciegos y los tramos filtrantes del entubado del sondeo y para saber qué tipo de rejilla es más adecuado a cada profundidad. En la fase de construcción y previo al entubado también es recomendable realizar un registro de verticalidad ya que, en caso de valores no admisibles, el coste de remediación será siempre inferior al que tendrá cuando el sondeo esté entubado y engravillado. En esta fase también se puede emplear para verificar la correcta cementación realizada en un sondeo, para detectar posibles entradas de aguas con distintas propiedades físico-químicas (aportes salinos, aguas contaminadas...).

Cuando se va a definir el **orden de entubación** de un sondeo, perforado a rotación directa o inversa con lodos, la realización de diagramas resulta esencial. El lodo suele generar una costra de baja permeabilidad en la pared del sondeo que sella las zonas productivas. Además, el detritus llega a superficie con un desfase temporal que aumenta con la profundidad de la perforación y que puede ser muy importante, haciendo difícil asignar una profundidad determinada a las muestras de detritus recogidas en la boca del sondeo. En estos casos se suelen realizar las diagramas de gamma natural, resistividad corta y larga, potencial espontáneo y de conductividad y temperatura del fluido. En el caso de los sondeos perforados por los métodos de percusión y de rotopercusión la testificación geológica puede ser suficiente para diseñar correctamente el entubado del sondeo. No obstante, la testificación geofísica siempre permite obtener mucha más información de la que se obtiene solo con la testificación geológica. En el caso de los sondeos perforados en rocas duras y en materiales kársticos, los registros de televiewer óptico y acústico combinados con el gamma natural y con los registros sísmicos permiten identificar la profundidad, la apertura, el buzamiento y la dirección de las fracturas, así como si estas están rellenas de arcilla o no, entre otras cuestiones.

3. Una vez finalizada la perforación es conveniente hacer su auscultación. Este proceso consiste en aplicar distintas técnicas de testificación geofísica para conocer cómo ha quedado finalizada

la captación y así poder certificar correctamente si se han cumplido, o no, las prescripciones técnicas indicadas por la dirección técnica de la obra.

El reconocimiento videográfico del sondeo es el registro más común en la fase de auscultación. La inspección con la cámara de video permite medir la profundidad total de la perforación, conocer el estado de la tubería, el acabado de las soldaduras, el correcto roscado de la tubería cuando se utilizan este tipo de uniones, la presencia de reducciones de diámetro, el grado de limpieza de los tramos de filtro, etc.

La sonda de calibre o las de TWS (*Televiewer* sónico) y TWO (*Televiewer* óptico), según el tipo de entubado, permiten determinar los diámetros internos de la entubación, la existencia de posibles irregularidades, en especial cuando se utilizan conos de reducción, deformaciones, colapsos, etc. También existen en el mercado sondas como la CCL (Casing Collar Location) diseñada para verificar la longitud y las uniones de los distintos tramos entubados en un sondeo.

El proceso de auscultación es esencial en sondeos de elevado presupuesto, dado que esta es la forma más veraz de realizar una correcta certificación final de la obra.

4. Durante el periodo de operación de sondeos de explotación de aguas subterráneas importantes, como es el caso de sondeos de abastecimiento a poblaciones, sondeos para riego de grandes extensiones de cultivo, o sondeos para uso industrial, es adecuado hacer un control periódico mediante registros videográficos. Esta labor de control permite prevenir posibles problemas operativos y en caso de que existan, identificarlos y plantear posibles soluciones o el abandono de la captación. Otro campo importante de aplicación de la testificación geofísica es la rehabilitación de sondeos. Las patologías más usuales que pueden presentarse son:

- Roturas o incluso colapso en la tubería.
- Bajada de caudal o caudal específico no imputable a descenso regional en el acuífero.
- Bajada de nivel piezométrico que compromete la sumergencia de la bomba.
- Caída accidental de electrobombas.
- Problemas relacionados con la calidad del agua.

Para acometer el proyecto de rehabilitación es muy importante realizar los estudios previos y verificaciones pertinentes, entre los que se incluye casi de forma obligatoria un diagnóstico preciso de la captación mediante testificación geofísica. En este caso, lo más habitual es realizar los registros relacionados con los aspectos constructivos, destacando el registro videográfico, desviación y diámetros. Con el análisis de estos registros se pueden abordar con mayor garantía de éxito el diseño y prescripciones de la rehabilitación (re-entubación, re-perforación, limpieza, desincrustación, operaciones de "pesca" de elementos caídos accidentalmente, etc.).

7.2.5. Control de la desviación del sondeo

Se ha considerado conveniente realizar un apartado específico para la medida de la desviación de los sondeos, dado que un sondeo mal construido puede tener serias dificultades para ser instalado con un equipo de bombeo o, simplemente, no puede ser equipado.

Hay que entender que la mayoría de los sondeos de explotación de aguas subterráneas, salvo algunos casos excepcionales de sondeos perforados a percusión, suelen estar desviados. La presencia de estratos inclinados en profundidad, el cambio de dureza de los materiales y la existencia de cavidades u otro tipo de oquedades favorecen la desviación de la perforación. Además de las causas geológicas, un empuje inadecuado de la sarta de perforación sobre el útil de corte, la presencia de holguras en la cabeza de rotación o una velocidad de perforación excesiva también son causas, en

este caso subsanables, que favorecen la desviación de un sondeo. En ese sentido, es recomendable dedicar atención al emplazamiento y a la nivelación inicial de la sonda de perforación, elegir una herramienta de corte adecuada a los materiales a perforar, realizar un buen control del empuje ejercido sobre el útil de corte, utilizar estabilizadores y controlar la velocidad de avance.

Antes de indicar cómo se mide la desviación de un sondeo y qué tipo de desviación se acepta como tolerable, se deben definir algunos conceptos de especial interés.

El primero de los conceptos a tener en cuenta es el de la verticalidad (*Plumbness*, en inglés). Un sondeo es vertical a una profundidad determinada cuando la proyección del sondeo, desde esa profundidad, en superficie, coincide con el punto central del inicio de la perforación. Si la proyección y el centro del punto de inicio de la perforación no coinciden, se puede medir la desviación (*drift*, en inglés), que es la distancia horizontal entre esos dos puntos y el azimut, que sería el ángulo entre el segmento que une el punto central del inicio de la perforación y el proyectado en superficie con respecto al norte magnético. La alineación o rectitud (*alignment*, en inglés) es el mantenimiento del eje del sondeo como una línea recta (figura 7.2.3).

En el caso de sondeos desviados pero alineados, si la desviación no es excesiva, podrá realizarse una correcta entubación y cementación (con centradores) y la bomba tendrá un funcionamiento correcto, aunque es posible que sea necesario utilizar centradores para evitar el contacto con el entubado. En el caso de sondeos desviados y no alineados, al superar ciertos límites se compromete su correcto entubado y cementación, el posterior funcionamiento de la bomba o incluso, su colocación y mucho más, su extracción para el mantenimiento, la operatividad del sondeo y su vida útil.

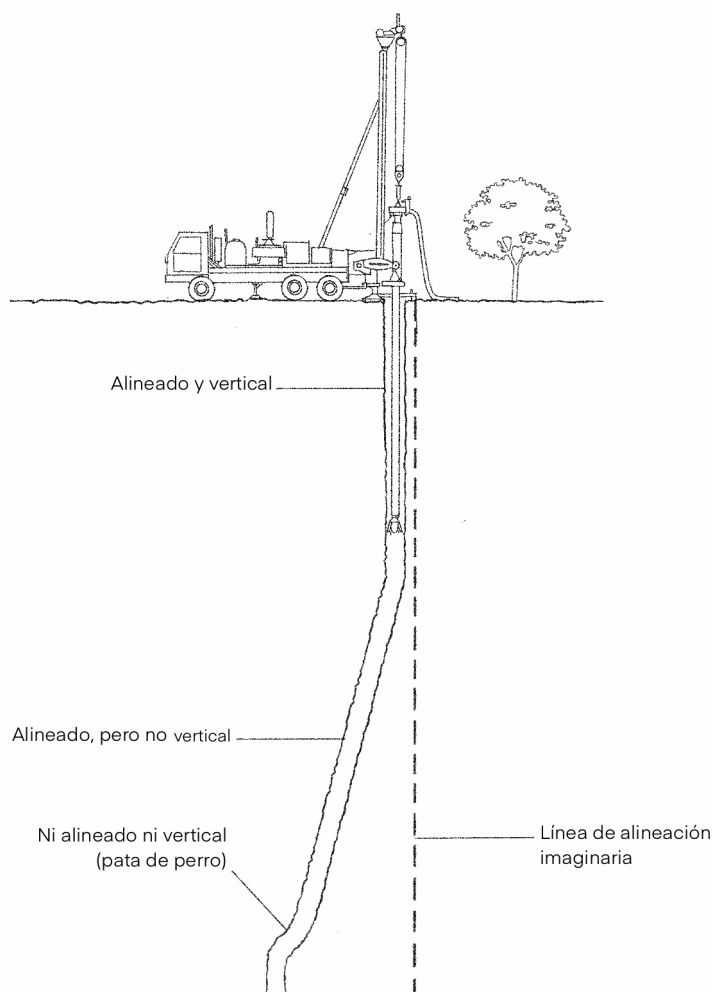


Figura 7.2.3. Conceptos de verticalidad y alineación.

Al entubar un sondeo se puede comprobar si el sondeo está construido con una desviación tolerable. Un descenso sin problemas de la entubación, sin atranques y en el que la tubería cuando está suspendida se puede girar sin que se produzcan rozaduras entre el tubo y la pared del taladro, es un sondeo que va a poder ser bien acondicionado. Asimismo, cuando se instala el equipo de bombeo para la realización del correspondiente ensayo de bombeo, es conveniente inspeccionar si existen dificultades en el descenso del equipo de impulsión, al igual que comprobar si se han producido rozaduras en la tubería de impulsión o en la bomba o si se han deteriorado los cables de alimentación a la bomba cuando se extrae el equipo de impulsión. Igualmente, en el reconocimiento videográfico final se van a apreciar posibles rozaduras en el entubado, o deterioros en las reducciones del mismo, relacionados con dicha pérdida de verticalidad.

Para medir la verticalidad y la alineación de un sondeo el procedimiento más habitualmente empleado es la testificación geofísica con sondas específicas para este uso. Los nuevos sistemas electrónicos que incorporan estas sondas y que miden la desviación se basan en la utilización de acelerómetros triaxiales, para determinar la inclinación, y magnetómetros triaxiales para medir el azimut. Si se trata de medir la orientación en terrenos con materiales magnéticos o sondeos entubados con tubería metálica, los magnetómetros se sustituyen por giroscopios, más caros y más delicados de manejo.

Los avances producidos por la industria petrolera, con motivo de la necesidad de control de la dirección de desviación de sondeos, han permitido disponer de tecnología cada vez más precisa, que ha sido exportada a la industria de testificación de sondeos de captación de agua subterránea. Los rangos de precisión disponibles en los equipos de testificación geofísica de sondeos de captación de aguas subterráneas cumplen con los rangos necesarios, que están comprendidos entre 0,1 y 0,2 grados para la inclinación y 0,5 y 1 grado para el azimut.

Dados los avances citados, hoy existen en el mercado equipos asumibles económicamente para las empresas perforadoras de sondeos de agua. Las lecturas de estos equipos se procesan y permiten establecer con precisión la geometría del sondeo, representarla de forma pseudotridimensional y calcular los parámetros necesarios para el dimensionado y colocación de la bomba.

Otra forma, menos sofisticada pero muy útil, para medir la verticalidad de un sondeo consiste en suspender un tubo largo mediante una grúa y comprobar si se puede realizar un giro libre de rozamiento al aplicar un par de rotación manual en el extremo superior. El método más aplicado para la medida de la verticalidad, según este procedimiento, es el propuesto por la AWWA (American Water Works Association). Consiste en descender un tubo de 40 pies (12 m) de longitud (dummy) con un diámetro exterior media pulgada (1,3 cm) menor que el diámetro interior del sondeo (libre o entubado) o del tramo a ensayar (figura 7.2.4). Según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) esto es válido cuando el diámetro del sondeo o entubado, es de 10" (25 cm) o menos; para diámetros de 12" (30 cm) o mayores, puede admitirse una diferencia de diámetros de 1" (2,5 cm). Se requiere que el descenso se produzca libremente en el tramo ensayado sin ningún tipo de obstáculo, roce ni obstrucción hasta por debajo de donde se vaya a colocar la bomba. Se considera que este sería el máximo grado de desalineación que permitiría la instalación de una bomba de eje vertical.

En España se suele admitir una desviación de los sondeos con respecto a la vertical de un grado sexagesimal por cada 100 m de perforación, cuando se perfora a rotación y rotopercusión, y prácticamente cero en percusión.

En la Unión Europea se admiten desviaciones máximas de 0,5° cada 50 m, en la cámara de bombeo, y de 1° cada 50 m en la zona productiva del sondeo.

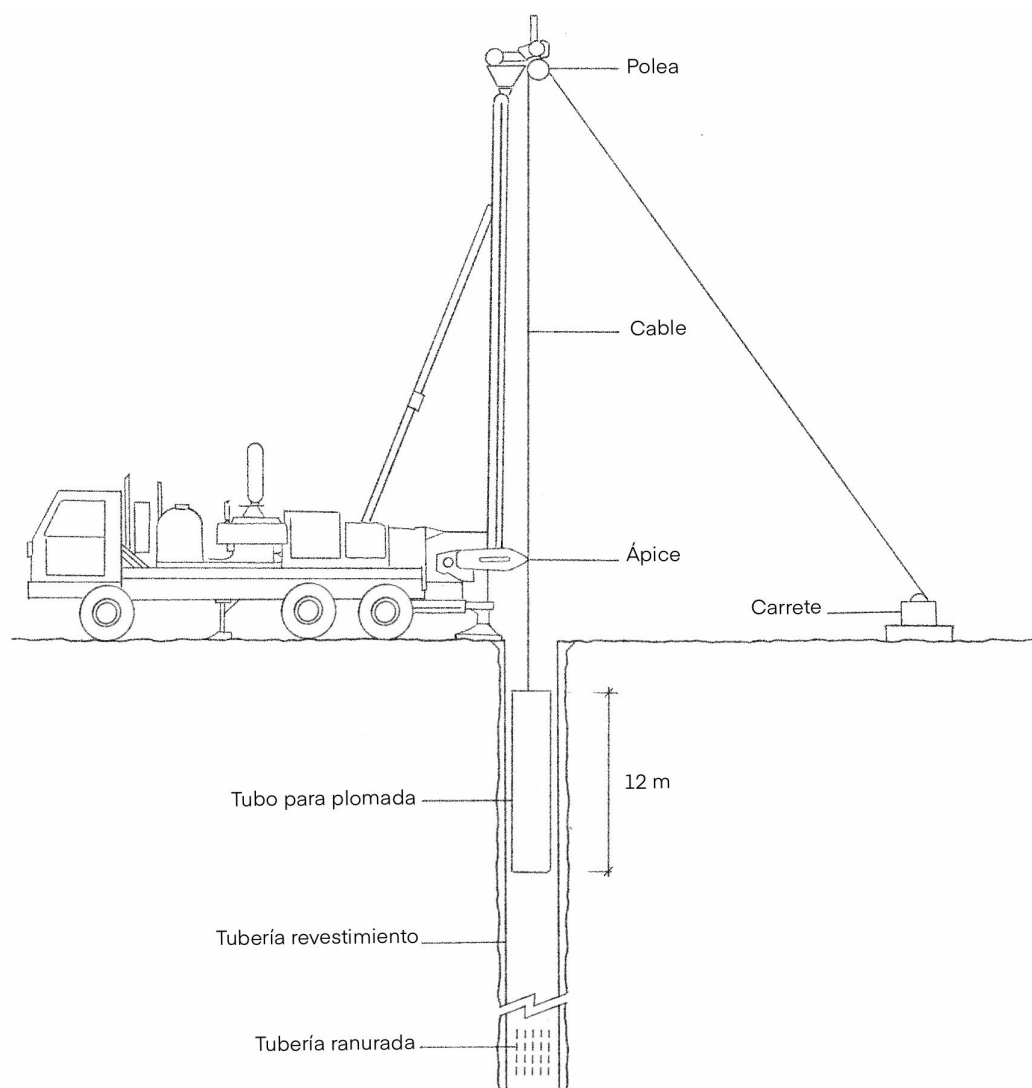


Figura 7.2.4. Medida de la verticalidad de un sondeo mediante el método AWWA usando un equipo de perforación.

7.3. Entubado

7.3.1. Consideraciones previas

La tubería de revestimiento de un pozo da estabilidad a las paredes de la perforación y permite o impide el paso del agua a su interior, mediante la conveniente colocación de tramos de tubos ciegos o filtrantes (rejillas o filtros), prefiltros o macizos de grava y la cementación del anular del pozo, si fuera necesario.

Al entubar un sondeo hay que utilizar tuberías que cuenten con una resistencia mecánica suficiente y que estén compuestas con materiales resistentes a las características físico-químicas del agua. Además, se debe evitar la corrosión electrolítica (que se produce al utilizar materiales metálicos de distinta composición) y seguir un procedimiento de instalación de la tubería adecuado. En el caso de las rejillas, estas deben estar seleccionadas para permitir la mayor entrada de agua en el interior del sondeo con las mínimas pérdidas de carga posibles y con la menor aportación de sedimentos.

En este epígrafe de la guía, se dan una serie de recomendaciones básicas que pueden ser de gran ayuda al diseñar la entubación de un sondeo.

7.3.2. Selección de la tubería

7.3.2.1. Resistencia físico-química

Hay que tener especial cuidado al seleccionar el material de fabricación de la tubería de un pozo, en especial cuando las aguas subterráneas son incrustantes o corrosivas.

Las aguas incrustantes favorecen la acumulación de materiales sobre las tuberías del sondeo, sobre todo en las rejillas, dificultando e incluso llegando a impedir la entrada de agua en el interior de la captación. Por su parte, las aguas corrosivas pueden atacar el material y disolver partes de la tubería (figura 7.3.1).

Las aguas corrosivas, o también denominadas agresivas, se distinguen por tener un pH ácido, un reducido contenido en bicarbonatos, cantidades de CO_2 libre mayores de 1 mg/l, altas concentraciones de cloruros (mayores de 250 mg/l) y concentraciones de O_2 disuelto mayores de 2 mg/l.

Las aguas incrustantes presentan unos pH mayores de 7, concentraciones de bicarbonatos por encima de 300 mg/l y contenidos de Fe^{2+} y Mn^{2+} mayores de 2 y 1 mg/l, respectivamente.



Figura 7.3.1. Detalle del estado de un tubo de acero normal corroído a los pocos años de su instalación en un acuífero con agua salada.
Autor: Juan Antonio Hernández Bravo.

Para cuantificar el grado de corrosividad y el de incrustabilidad de un agua, y poder conocer el material adecuado para entubar un pozo, se pueden utilizar distintos índices como los de Ryznar y Langelier. El índice de Ryznar (Custodio y Llamas, 1983; Bayó, 1996), se define como:

$$IR = 2 \text{ pH}_e - \text{pH}_i$$

donde:

pH_e es el pH de equilibrio con la calcita y

pH_i es el valor de pH del agua muestreada.

El valor del pH_e se puede calcular a partir del logaritmo de las concentraciones del agua en bicarbonatos y en calcio o de una serie de constantes experimentales (ver Custodio y Llamas, 1983). Sin embargo, dicho pH también puede aproximarse a partir de la ecuación de Tillmans (Bayó, 1996), donde:

$$\text{pH}_e = 7 - (\text{Log } 3/0,61 \times (\text{CO}_2 \text{ libre}_{\text{ppm}} / \text{TAC}_{\text{ppm CaCO}_3})).$$

Para aplicar esta ecuación hace falta conocer la concentración de CO_2 libre en ppm y la alcalinidad total (TAC) expresada en ppm de CaCO_3 .

De este modo, aguas muy incrustantes presentan un IR comprendido entre 4 y 5, aguas poco incrustantes o poco corrosivas tienen IR entre 6 y 7, mientras que aguas muy corrosivas pueden alcanzar valores de IR superiores a 9. En la tabla 7.3.1 se indica el grado de corrosividad o incrustabilidad del agua según el Índice de Ryznar, mientras que en la tabla 7.3.2 se presentan los materiales de entubado recomendados para distintos tipos de agua.

Índice Ryznar (IR)	Tipo de agua
4 a 5	Muy incrustante
5 a 6	Moderadamente incrustante
6 a 7	Poco incrustante y/o corrosiva
7 a 7,5	Corrosiva
7,5 a 9	Francamente corrosiva
>9	Muy corrosiva

Tabla 7.3.1. Tipos de agua en función del índice de Ryznar (Bayó, 1996).

Índice Ryznar (IR)	Material de entubado adecuado
Entre 7 y 8	Acero normal
6,5 y 8	Hierro Armco
6 y 8,5	Bronce rojo al silicio
< 9	Everdur
< 9,5	Monel 400
<10	Acero inox. 405
<12	Acero inox 304
<15	Acero inox 304 (bajo C)
<16	Acero inox 316
<18	Acero inox 316 (bajo C)
Entre 7 y 18	ABS, PVC, plásticos, madera con resina o epoxi

Tabla 7.3.2. Tipos de material recomendado para la entubación de un sondeo en función del índice de Ryznar del agua subterránea (Bayó, 1996).

Otra forma de evaluar el grado de corrosividad o de incrustabilidad de un agua es mediante el uso del índice de Langelier o de saturación (IL), que es igual a la diferencia entre el pH medido, del agua considerada, y su pH de equilibrio o saturación (pHs):

$$IL = pH - pH_s$$

El índice de Langelier presenta la siguiente expresión

$$IL = pH + TC + CF + AF - 12,1$$

donde:

pH = valor medido en la muestra de agua,

TC = factor de temperatura,

CF = factor de dureza,

AF = factor de alcalinidad total (TAC), estos valores están tabulados en la tabla 7.3.3.

Temperatura		Dureza		Alcalinidad total	
°C	TC	ppm	CF	ppm	AF
0	0	5	0,5	5	0,7
3	0,1	25	1	25	1,4
8	0,2	50	1,3	50	1,7
12	0,3	75	1,5	100	1,9
15	0,4	100	1,6	150	2
19	0,5	150	1,8	200	2,2
24	0,6	200	1,9	250	2,4
29	0,7	400	2,1	300	2,5
34	0,8	800	2,2	400	2,6

Tabla 7.3.3. Valores de los parámetros TC, CF y AF de la expresión de Langelier en función de la temperatura del agua, dureza y alcalinidad total, respectivamente.

El agua se considera corrosiva si el IL que resulta es menor de -0,5 e incrustante si el IL es mayor de 0,5.

Los materiales más utilizados en la construcción de pozos son el acero naval (S-235), el cloruro de polivinilo de tipo U (PVC-U) y el acero inoxidable. Existen, sin embargo, multitud de aleaciones metálicas, de compuestos plásticos y de otra naturaleza, adecuados para distintas condiciones especiales.

Las tuberías utilizadas en la construcción de pozos de petróleo, que siguen distintos tipos de especificaciones como las normalizadas por el API (American Petroleum Institute), suelen ser excesivamente caras para su uso en captaciones de explotación de aguas subterráneas, pero es cierto que son tuberías con altas prestaciones respecto a la resistencia mecánica, unidas mediante rosca, sin costuras y compuestas con distintos tipos de aleaciones metálicas adaptadas a las condiciones requeridas de salinidad, temperatura y corrosividad.

El acero estándar, también conocido como chapa naval o acero al carbono (H-40) (S-235), consiste en una aleación de hierro con una pequeña cantidad de carbono (0,8 % como máximo). Es el más utilizado para construir tuberías de pozos para captación de agua subterránea por su precio, su facilidad de soldadura (al tener un bajo contenido en carbono) y sobre todo por su elevada resistencia mecánica. Cuando se requiere cierta resistencia mecánica pero las aguas son moderadamente corrosivas

se puede recurrir a colocar tuberías de acero naval recubiertas con resina epoxi o con algunos plásticos especiales, que les dan mayor resistencia físico-química. Con todo, se debe ser muy cuidadoso en la instalación de la tubería recubierta con epoxi para evitar rozaduras durante su descenso al interior del pozo. Otra opción consiste en recurrir al uso de tuberías con aleaciones especiales.

El PVC-U, que es el recomendado para la construcción de pozos de agua, tiene una gran resistencia físico-química tanto para aguas corrosivas como para aguas incrustantes. Es muy utilizado en los pozos que captan agua de mar para suministrarla a las plantas desaladoras. Sin embargo, presenta una baja resistencia mecánica, que se suple aumentando el grosor de la tubería. No se deben utilizar tuberías de PVC convencional cuando el pozo vaya a ser utilizado para abastecimiento. Tampoco se deben emplear tubos de PVC unidos mediante remaches y, menos aún, con cola, dado que suelen tener en su composición productos tóxicos. La unión mediante rosca sin recalque externo es la más recomendada. No es conveniente, tampoco, el uso de tubería de PVC convencional cuando se cimente el anular del pozo, por el posible deterioro de la misma por la reacción exotérmica durante la fase de fraguado. De igual modo, se recomienda evitar la exposición prolongada al sol de los tubos de PVC y deben asegurarse unas buenas condiciones de transporte hasta el emplazamiento del pozo. Es muy frecuente la ruptura de estos tubos cuando los traslados no se hacen en las condiciones adecuadas. Por eso, no se debe descuidar nunca la recepción de este material a pie de obra.

Otra opción bastante más cara que el acero normal es el acero inoxidable. El acero inoxidable, a diferencia del acero normal, tiene en su aleación componentes como el cromo, el níquel, el manganeso, etc., que se añaden al hierro y al carbono. En el caso del acero inoxidable de la serie 304, muy utilizado en los pozos de las embotelladoras de agua mineral, la aleación tiene un 18 % de cromo, 8 % de níquel, 2 % de manganeso, 0,08 % de carbono y el resto de hierro. Este material tiene una alta resistencia a la compresión exterior y a las aguas moderadamente corrosivas.

Para un mayor detalle sobre las normas de calidad y características de las tuberías es recomendable consultar la abundante normativa existente (API, ASTM, UNE, DIN, etc.).

7.3.2.2. Resistencia mecánica

Los empujes que debe soportar la tubería de un sondeo de explotación de aguas subterráneas son múltiples. Entre ellos se pueden citar los del terreno, los hidrostáticos, los de tracción, los debidos a la relajación del macizo rocoso, empujes de impacto (por colapsos en zonas cercanas al pozo), compresión exterior radial, tensión axial, cizalladura, torsión, etc.

Los esfuerzos a tener en cuenta a la hora de diseñar un pozo de explotación de agua subterránea son los de tracción de compresión radial. Los demás tipos de esfuerzos son calculados cuando se diseñan sondeos de gran profundidad.

El esfuerzo de tracción se concentra en las zonas de unión de los tubos. Cuando la unión entre tubos se hace mediante rosca, es necesario conocer el peso de la tubería suspendida que puede soportar la rosca.

Los empujes provocados por el terreno no suelen ser relevantes. Su cálculo es complejo y por ello se suele recurrir a utilizar soluciones simplistas que utilizan factores que hacen que los cálculos resulten del lado de la seguridad. Así, el empuje radial centrípeto del terreno P_e , se puede expresar como sigue (Bayó, 1996):

$$P_e = \gamma_{med} \times h \times k_e,$$

donde: γ_{med} = densidad media del terreno (2-2,3 t/m³),

h = profundidad en metros, y

k_e = coeficiente empírico comprendido entre 0 y 1.

El coeficiente k_e depende de la profundidad, del grado de fracturación de la roca, tensión residual, geopresión compactacional, etc. En materiales consolidados a menos de 300 m se le asigna un valor de 0,1 y a más de 300 m de profundidad valores comprendidos entre 0,1 y 0,2. En materiales no consolidados se utilizan valores comprendidos entre 0,1 y 0,7; y entre 0,5 y 1 cuando están sometidos a geopresión compactacional.

Por lo tanto, para materiales consolidados con densidades de $2,2 \text{ t/m}^3$ y coeficiente k_e de 0,1, cada 100 m aumenta la presión de empuje del terreno en 2 kg/cm^2 (22 t/m^2). En terrenos inconsolidados con coeficiente k_e de 0,2 el empuje aumenta cada 100 m de profundidad en 4 kg/cm^2 . Estos esfuerzos no suelen ser relevantes en pozos con entubado metálico.

En la figura 7.3.2 se indican algunos valores orientativos de la resistencia a la presión que soportan distintas tuberías ciegas de acero según su composición, diámetro y espesor.

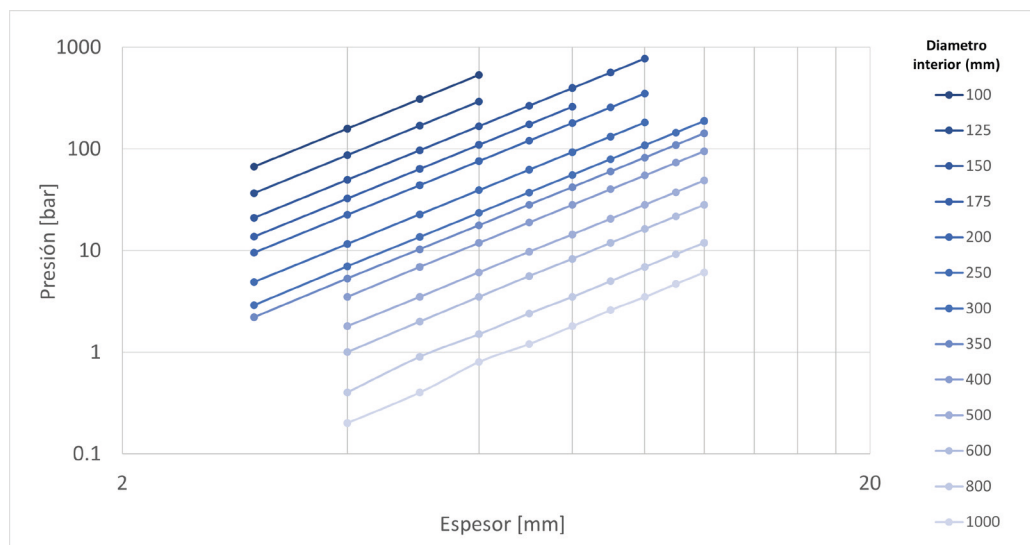


Figura 7.3.2. Resistencia a la presión exterior de tuberías ciegas de acero utilizadas en la construcción de pozos (valores tomados del catálogo Pesa Well Engineering, S.L.).

Los esfuerzos que suelen generar el aplastamiento de las tuberías de pozos de captación de aguas subterráneas son los provocados por la diferencia hidrostática entre los fluidos existentes en el interior y el exterior de la tubería de revestimiento. Los empujes hidrostáticos que se deben tener muy en cuenta son los siguientes: i) los provocados por la cementación de grandes longitudes del anular de un sondeo, ii) los debidos a grandes diferencias de nivel piezométrico entre el agua del interior del sondeo y la del anular externo a la tubería y iii) los producidos al colocar los macizos de grava vertidos desde superficie (especialmente en pozos entubados con PVC).

Una columna de fluido en el interior del pozo genera una presión radial centrípeta (P_e) de forma que:

$$P_e = \gamma_{\text{fluido}} \times h$$

Si el fluido es agua, su densidad es de 1 t/m^3 , si es lechada de cemento más bentonita la densidad suele ser de $1,9 \text{ t/m}^3$ y si es el lodo que se genera al perforar en circulación inversa es de $1,1 \text{ t/m}^3$. La presión aumenta entre 10 kg/cm^2 y 19 kg/cm^2 por cada 100 m de columna de agua cuando se trata de 100 m de lechada de cemento. Estas presiones pueden afectar a algunos tubos, por eso se deben analizar las presiones que se generan durante las operaciones de cementación y la resistencia al aplastamiento de la tubería seleccionada.

En las figuras 7.3.3, 7.3.4 y 7.3.5 se han ilustrado distintos supuestos y se han representado los diagramas de presión que se generan, con objeto de facilitar el cálculo de presiones radiales centrípetas.

De este modo, en la figura 7.3.3 A se presenta el diagrama de presiones de un pozo en el que el nivel del agua en el interior de la tubería y el nivel del agua en el anular de la perforación es el mismo. La presión hidrostática en el punto más profundo de la tubería (en A) es la diferencia entre la presión radial exterior y la interior. Al ser iguales, la presión hidrostática resultante es nula.

En el caso de la figura 7.3.3 B se ha representado el diagrama de presiones que se produce en un pozo cuando se procede a su cementación mediante un tubo auxiliar de cementación introducido por el anular. Se considera una densidad de la lechada de cemento-bentonita de $1,9 \text{ t/m}^3$. Las diferentes alturas de la columna de cemento y del agua y las diferentes densidades de ambos fluidos provocan que la presión radial centrípeta exterior en el fondo del pozo sea mayor que la presión interior generada por la columna de agua. En el ejemplo propuesto resulta una presión en el punto inferior A de $21,8 \text{ kg/cm}^2$, que es una presión considerable a la hora de seleccionar la resistencia mecánica de la tubería. Una tubería ciega metálica de 300 mm de diámetro interior y 5 mm de espesor no resistiría (figura 7.3.2).

Es conveniente hacer estos sencillos cálculos de presión cuando se va a realizar la cementación del anular de un pozo. Si las presiones resultan elevadas se debe recurrir a tuberías metálicas de mayor espesor o a la cementación por fases del anular. Es decir, se debe un tramo, esperar a que fragüe la lechada, y cementar otro tramo, así hasta conseguir la columna de cementación necesaria.

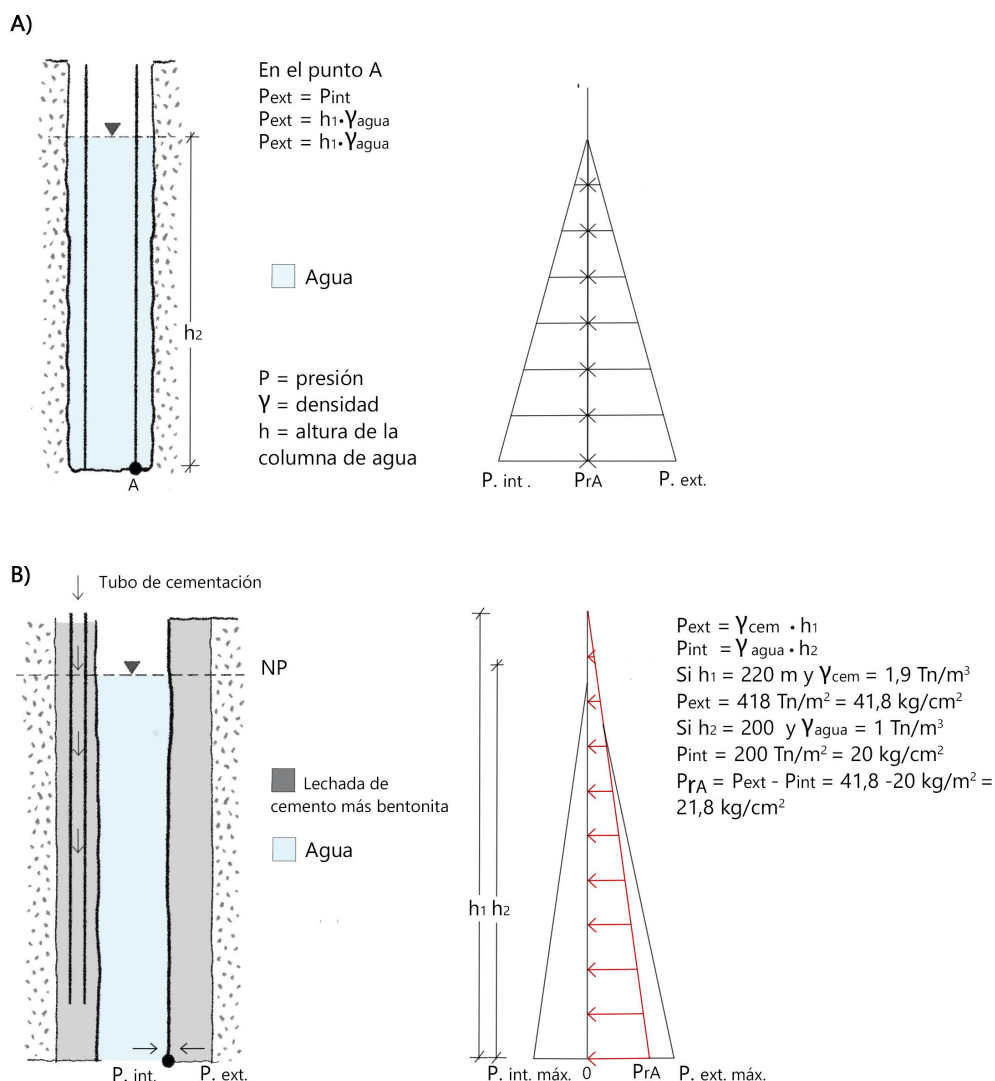
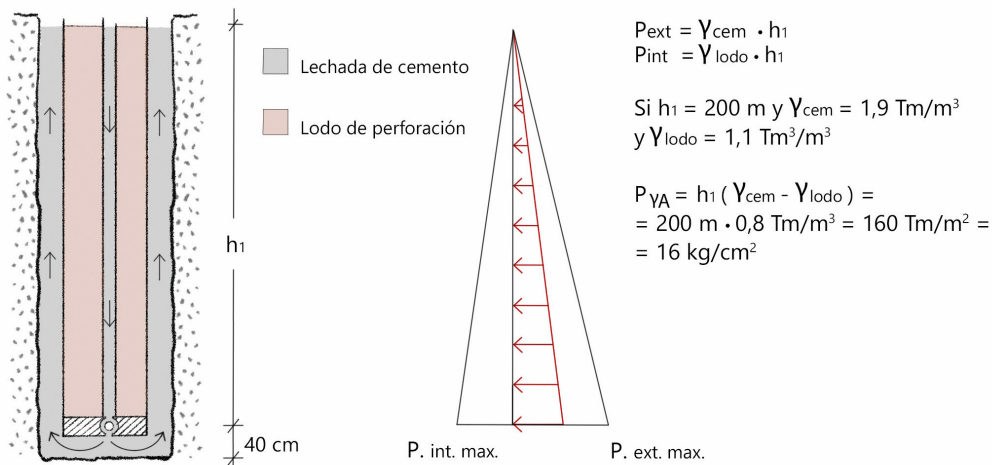


Figura 7.3.3. A) Diagramas de presión en un pozo con el mismo nivel piezométrico dentro y fuera del entubado del sondeo. B) y en un pozo en el que se está cementando el anular mediante inyección de lechada de cemento más bentonita con un tubo auxiliar introducido por el propio anular.

En el ejemplo de la figura 7.3.4 A se representa el caso de una cementación de un pozo mediante inyección a presión de la lechada con una tubería de inyección interior roscada a una válvula de pie perforable. En este caso el interior del pozo se supone relleno hasta la superficie de lodo de perforación (en sondeos que se perforan a circulación inversa se puede considerar una densidad de $1,1 \text{ t/m}^3$). Las diferencias en la densidad hacen incrementar la presión con la profundidad. En el ejemplo considerado la presión radial centrípeta resultante en el punto inferior del sondeo, A, es de 16 kg/cm^2 .

Se ha representado en la figura 7.3.4 B una situación muy frecuente, que suele dar lugar al aplastamiento de muchas tuberías de revestimiento de pozos. Cuando se construyen pozos en acuíferos confinados con el nivel piezométrico profundo, se suele perforar y entubar un primer tramo con mayor diámetro que el inferior. Si se ha perforado un acuífero aluvial, un acuífero libre superficial con un nivel piezométrico poco profundo o un acuífero multicapa, puede entrar agua de estos niveles colgados quedando atrapada en el anular comprendido entre la tubería y la pared del sondeo. Si la altura de esta columna de agua es elevada, se generan grandes sobrepresiones. En el ejemplo resultan 20 kg/cm^2 .

A)



B)

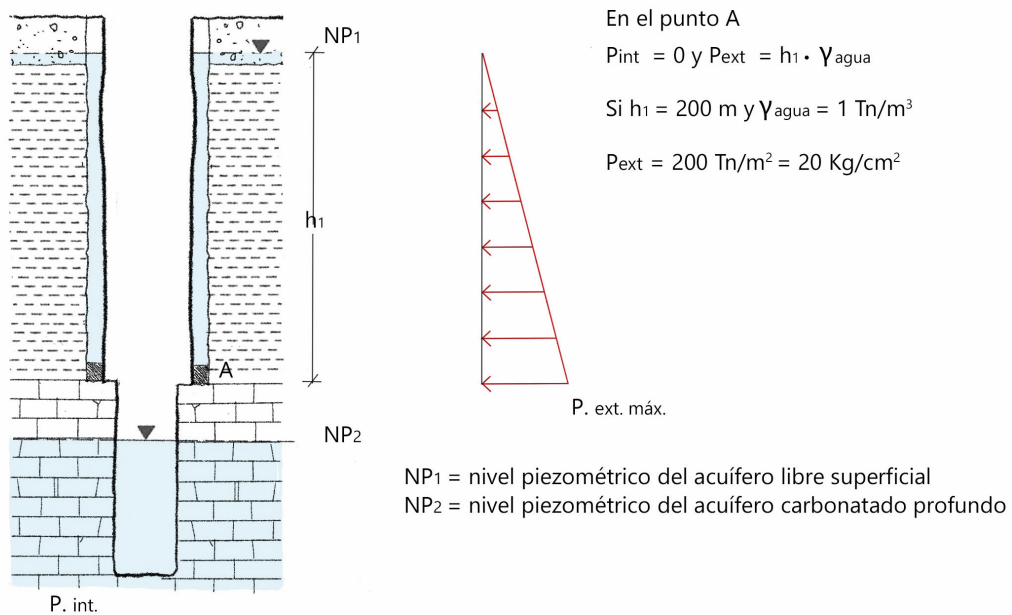


Figura 7.3.4 A) Diagramas de presiones hidrostáticas en un pozo en el que se está cementando el anular del sondeo mediante inyección de lechada de cemento más bentonita con un tubo auxiliar introducido por el interior del sondeo y una válvula de pie perforable en el fondo de la tubería. B) Diagrama de presión hidrostática de una columna colgada en el anular de un pozo.

En algunas perforaciones emboquilladas en las proximidades de un cauce seco, durante los periodos de lluvias torrenciales, se puede producir la aportación de agua del aluvial al sondeo, si este no ha sido convenientemente cementado. Se crea entonces una columna de agua en el anular que puede provocar la implosión de la tubería. Este mismo incremento de presión también se produce en algunos ensayos de bombeo de pozos con una reducida transmisividad. Al comienzo del ensayo los niveles dinámicos pueden descender muy rápido, quedando una columna de agua colgada en el anular que genera una presión exterior a considerar. Por estos motivos es necesario conocer las características constructivas de un pozo (tramos cementados y enrejillados, diámetro y grosor de las tuberías...) antes de hacer un ensayo de bombeo en el que se prevén niveles dinámicos considerables.

Por último, el caso de la figura 7.3.5 es el que se produce durante la colocación de un macizo de grava mediante su vertido desde superficie con la ayuda, en el caso representado, de una tubería auxiliar de distribución radial de la grava. En este caso, durante el descenso de la grava desde la superficie hasta el interior del pozo, la densidad de la columna de agua con la grava suspendida ($1,1 \text{ t/m}^3$) en el anular comprendido entre el tubo y la pared del sondeo, es mayor que la densidad del agua en el interior del tubo, creándose una sobrepresión durante esta operación, que en el caso del ejemplo representado es de $1,4 \text{ kg/cm}^2$. Esta presión es poco importante en el caso de tuberías metálicas, pero lo puede ser cuando se entuba con PVC. Por lo que en caso de tener que engravillar un tramo largo de un sondeo entubado en PVC, se recomienda hacer estos cálculos y comprobar, en las tablas que se adjuntan, la resistencia mecánica del tubo PVC que se quiere instalar.

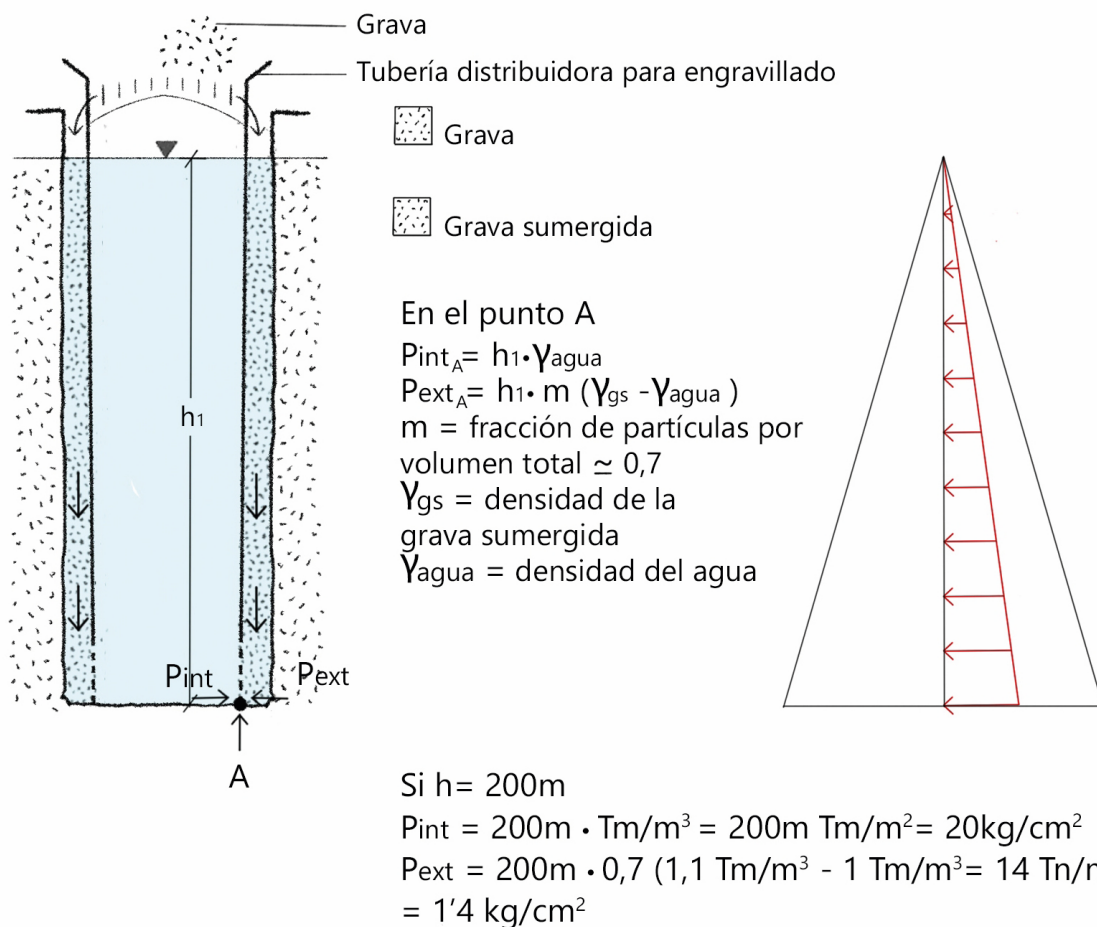


Figura 7.3.5. Diagramas de presión en un pozo en el que se está introduciendo un macizo de grava vertido desde la superficie con una tubería auxiliar con ventanas para ayudar en la distribución de la grava por el anular.

En las tablas 7.3.4, 7.3.5 y 7.3.6 se indican los espesores de tubería recomendados para distintos diámetros y profundidades de tuberías de acero al carbono y de tuberías de PVC. No obstante, es necesario hacer cálculos de las posibles presiones hidrostáticas que se pueden generar en un pozo durante su fase de diseño.

Profundidad de tubería de revestimiento (m)	Diámetro nominal de la tubería de revestimiento (mm)									
	203	254	305	356	406	457	508	559	610	762
0-30	4	4	4	5	5	6	7	8	8	8
30-60	4	4	5	6	6	7	7	8	8	8
60-90	4	5	5	6	7	7	8	8	9	9
90-120	4	5	6	7	7	8	8	8	9	9
120-180	5	5	6	7	7	8	8	9	10	10
180-240	5	6	6	7	8	8	9	10	10	11
240-300	6	6	7	7	8	9	9	10	11	12
300-450	6	7	7	8	8	9	10	11	-	-
450-600	6	7	8	8	9	10	11	11	-	-

Tabla 7.3.4. Espesor mínimo (mm) de tuberías de revestimiento de acero y sencillas (Norma Técnica Colombiana NTC 5539, modificada).

Pulgadas (")	Diámetro Ext. x Int. (mm)	Espesor Pared (mm)	Profundidad Recomendada (m) *	PN	SDR	Resistencia Colapso bar (Kp/cm ²)	Pulgadas (")	Diámetro Ext. x Int. (mm)	Espesor Pared (mm)	Profundidad Recomendada (m) *	PN	SDR	Resistencia Colapso bar (Kp/cm ²)
1"	32 x 28	2,0	100-200	12,5	16	20,3	6"	165 x 155	5,0	50-75	7,5	33	2,1
1"	32 x 27,2	2,4	200-300	16	13	36,4	6"	165 x 150	7,5	100-200	12,5	22	7,4
1-¼"	40 x 36	2,0	100-200	12,5	20	10,0	6"	165 x 146	9,5	200-300	16	17	15,6
1-¼"	40 x 33	3,5	200-300	16	11	60,3	6 ½"	180 x 166	7,0	75-100	10	26	4,5
¾"	26,4 x 19,6	3,1	300 +	20	9	161,0	6 ½"	180 x 162,8	8,6	100-200	12,5	21	8,6
1"	33,2 x 25,6	3,8	300 +	20	9	147,6	7"	200 x 190,2	4,9	0-50	6,3	41	1,1
1-¼"	41,6 x 31,6	5,0	300 +	20	8	170,1	7"	200 x 188,2	5,9	50-75	7,5	34	1,9
1-½"	47,8 x 38,2	4,8	300 +	20	10	93,8	7"	200 x 184,6	7,7	75-100	10	26	4,4
2"	59,5 x 51,5 HIR	4,0	200-300	20	15	25,6	7"	200 x 180,8	9,6	100-200	12,5	21	8,8
1-¾"	50 x 45,2 HIR	2,4	100-200	12,5	21	8,8	8"	225 x 211,8	6,6	50-75	7,5	34	1,9
2"	63 x 58,2	2,4	100-200	10	26	4,2	8"	225 x 207,6	8,7	75-100	10	26	4,4
2"	63 x 57	3,0	100-200	12,5	21	8,5	8"	225 x 203,6	10,7	100-200	12,5	21	8,5
2-½"	75 x 69,2	2,9	75-100	10	26	4,4	8"	225 x 199	13,0	200-300	16	17	15,8
2-½"	75 x 67,8	3,6	100-200	12,5	21	8,8	9"	250 x 237,6	6,2	0-50	6,3	40	1,1
3"	90 x 83	3,5	75-100	10	26	4,5	9"	250 x 235,4	7,3	50-75	7,5	34	1,9
3"	90 x 81,4	4,3	100-200	12,5	21	8,6	9"	250 x 230,8	9,6	75-100	10	26	4,4
3"	90 x 76,6	6,7	200-300	20	13	35,6	9"	250 x 226,2	11,9	100-200	12,5	21	8,5
3-½"	110 x 103,6	3,2	50-75	7,5	24	1,8	10"	280 x 255	12,5	200-300	12,5	22	7,0
3-½"	110 x 101,6	4,2	75-100	10	26	4,3	10"	280 x 248	16,0	0-50	16	18	15,2
3-½"	110 x 99,4	5,3	100-200	12,5	21	8,9	11"	315 x 299,6	7,7	50-75	6,3	41	1,1
4"	113,8 x 103,8	5,0	100-200	12,5	23	6,6	11"	315 x 296,6	9,2	75-100	7,5	34	1,9
4"	113 x 96,6	8,2	200-300	16	14	32,0	11"	315 x 290,8	12,1	100-200	10	26	4,4
4-½"	125 x 117,6	3,7	50-75	7,5	34	1,9	11"	315 x 285	15,0	200-300	12,5	21	8,5
4-½"	125 x 115,4	4,8	75-100	10	26	4,4	12"	330 x 301	14,5	100-200	12,5	23	6,6
4-½"	125 x 113	6,0	100-200	12,5	21	8,8	12"	330 x 292	19,0	200-300	16	17	15,6
4-½"	125 x 110	7,5	200-300	16	17	17,8	13"	355 x 321,2	16,9	100-200	12,5	21	8,5
5"	140 x 126,6	6,7	100-200	12,5	21	8,7	14"	400 x 376,6	11,7	50-75	7,5	34	1,9
5"	140 x 120	10,0	200-300	16	14	31,1	14"	400 x 369,2	15,3	75-100	10	26	4,3
5-½"	160 x 150,6	4,7	50-75	7,5	34	1,9	14"	400 x 361,8	19,1	100-200	12,5	21	8,6
5-½"	160 x 147,6	6,2	75-100	10	26	4,5	16"	450 x 411	19,5	100-200	12,5	23	6,4
5-½"	160 x 144,6	7,7	100-200	12,5	21	8,8	18"	500 x 475,4	12,3	0-50	6,3	41	1,1
							18"	500 x 470,8	14,6	50-75	7,5	34	1,9
							18"	500 x 461,8	19,1	75-100	10	26	4,3
							24"	630 x 593,2	18,4	50-75	7,5	34	1,9

Tabla 7.3.5. Espesor mínimo (mm) para tuberías de revestimiento de PVC, en función de la resistencia al colapso (origen: distintos catálogos comerciales).

Ø Exterior [mm]	Diámetro Nominal [DN] DIN 4925	Gama Espesor	Ø Exterior Manguito [mm]	Interior [mm]	Espesor Pared [mm]	Peso [kg/m]	Resistencia Tracción [kg]	Resistencia Compresión [bar]
195	175	L	205	178,0	8,5	7,4	5000	6
195	175	E	211	172,0	11,5	9,8	8000	16
200	N / Fábrica	L	211	185,0	7,5	7,4	3800	5
200	N / Fábrica	E	216	181,0	9,5	9,2	6700	9
200	N / Fábrica	R	220	178,0	11,0	10,8	8300	15
225	N / Fábrica	L	243	207,0	9,0	10,0	7000	7
225	200	E	246	205,0	10,0	11,9	8000	7
225	200	R	249	199,0	13,0	12,8	12000	15
250	N / Fábrica	L	266	230,8	9,6	10,5	7500	7
250	N / Fábrica	E	272	226,0	12,0	11,9	9500	9
250	N / Fábrica	R	277	222,0	14,0	13,2	13000	16
280	N / Fábrica	L	297	259,0	10,5	13,5	8000	7
280	250	E	300	255,0	12,5	15,6	10000	7
280	250	R	304	248,0	16,0	19,6	15000	15
315	N / Fábrica	L	349	291,0	12,0	20,3	8000	7
315	N / Fábrica	E	335	285,0	15,0	21,2	14500	8
315	N / Fábrica	R	339	277,6	18,7	27,0	19500	15
330	300	L	350	301,0	14,5	21,2	14500	6
330	300	E	356	292,0	19,0	27,4	22000	15
330	300	R	364	287,0	21,5	30,7	26000	22
400	350	L	425	365,0	17,5	31,0	18000	6
400	350	E	433	357,0	21,5	37,6	23000	12
400	350	R	435	352,0	24,0	41,7	25000	17
450	400	L	475	411,0	19,5	38,9	26000	6
540	500	E	570	500,0	20,0	48,1	24000	4
630	600	E	655	593,4	18,3	52,4	17000	2

Tabla 7.3.6. Recomendaciones para la instalación de tuberías PVC-U para pozos y sondeos, con unión a base de rosca trapezoidal. Espesor recomendado para instalaciones de 50-100 m (L), 100-250 m (E) y 200-500 m (R). (Tomado de catálogo Pesa Well Engineering, S.L.).

7.3.3. Rejillas o filtros

La tubería de un pozo que permite el paso de agua a su través se denomina rejilla o filtro. Debe estar diseñada para permitir la mayor entrada de agua en el interior del sondeo, con las mínimas pérdidas de carga posibles y la mínima entrada de sedimentos. Otro aspecto a tener muy en cuenta es la resistencia a la deformación. La rejilla es la parte más débil de la entubación.

Las principales características de las rejillas están definidas por el material con el que se construyen, la forma y la dimensión de sus aperturas y el porcentaje de área abierta.

Las rejillas construidas en acero se pueden clasificar en:

- i) Con hendiduras (no se elimina material de la tubería). Estarían incluidas las rejillas de puentecillo y la de tipo persiana (louvered). Con porcentajes de área abierta comprendidos entre el 7 y el 23 %.
- ii) Con ranuras o troquel (se elimina material de la tubería). Pueden fabricarse con ranuras rectangulares, redondas y oblongas.
- iii) Filtros especiales. Filtro continuo Johnson (porcentaje de área abierta del 5 al 70 %) y filtros con empaque de gravas.

Las rejillas de PVC y de otros materiales plásticos se pueden clasificar en:

- i) Ranuradas o troqueladas (se elimina material). Suelen ser rectangulares con porcentajes de área hueca comprendidos entre el 8 y el 14 %.
- ii) Filtros especiales. Filtro continuo Stüwa (porcentaje de área abierta del 8 al 46 %), filtros con empaque de gravas y filtros fijados con resina.

La velocidad de entrada y la velocidad vertical dentro de la rejilla son las variables que definen el funcionamiento del filtro.

La velocidad de entrada se calcula dividiendo el caudal del pozo por el área abierta del filtro.

$$V_{ent} = Q/A,$$

donde:

V_{ent} = velocidad en la ranura del filtro (m/s), y

Q = caudal (m^3/s), y

A = es el área abierta del filtro (m^2).

La velocidad vertical se calcula dividiendo el caudal por la sección circular de la tubería.

Algunos autores recomiendan que el flujo en los filtros debe ser laminar, por ello proponen velocidades de entrada inferiores a la velocidad crítica (0,03 m/s). Por esta razón se ha considerado la velocidad de entrada de 0,03 m/s como un criterio estándar para dimensionar los filtros de un pozo (Driscoll, 1986). Otros autores recomiendan velocidades de hasta 0,46 m/s (American Water Works Association) e incluso velocidades entre 0,6 y 1,2 m/s (Moss and Moss, 1990). La velocidad vertical en el interior de la rejilla no debe superar 1,52 m/s (Driscoll, 1986) o 1,22 m/s (American Water Works Association), para evitar el flujo turbulento y minimizar las pérdidas de carga. Estas velocidades se cumplen habitualmente en las dimensiones de tubería recomendadas. En este sentido, se debe tener en cuenta que, aunque se diseñe un filtro siguiendo el criterio de la velocidad crítica, el flujo de entrada en el tramo de rejilla no es uniforme, dado que tiende a concentrarse en la parte de la rejilla más próxima a la bomba, circulando parte del caudal por el anular hasta llegar a ese tramo de rejilla. Por eso no se suele conseguir una entrada de agua en régimen laminar y por eso la mayoría de los pozos operan normalmente en régimen turbulento.

Habitualmente, se procede de forma inadecuada a la colocación de tubos ciegos ranurados a soplete o con una sierra radial a pie de obra. El reducido número de ranuras que se practican, su excesiva apertura y su forma irregular hacen que no sea recomendable su uso. Generalmente los porcentajes de área hueca son inferiores al 4 %, y suelen reducirse con el paso del tiempo a la mitad. Las pequeñas superficies de paso generan altas velocidades de entrada y pérdidas de carga considerables al penetrar el agua en el interior del pozo y aceleran los procesos de formación de incrustaciones, disminuyendo el rendimiento de la captación. Por otro lado, el corte a soplete genera en las ranuras acumulaciones de materiales que pueden alterar la calidad del agua.

En el mercado existe una amplia variedad de filtros, si bien los tres tipos de rejillas comerciales más empleados son las de puentecillo, las ranuradas en fábrica y las de filtro de apertura continua, también conocidas como de tipo Johnson (figura 7.3.6).

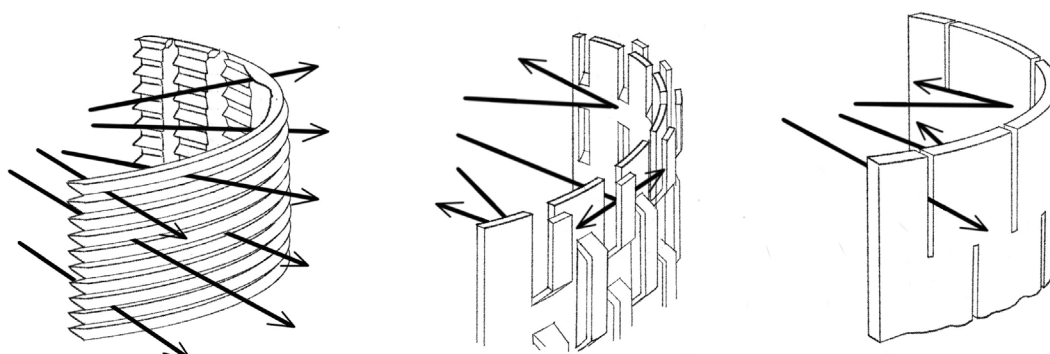


PUENTECILLO

RANURADA

TIPO JOHNSON

Figura 7.3.6. Principales tipos de filtros o rejillas para pozos de captación de agua subterránea. De izquierda a derecha, rejillas de puentecillo, ranuradas y de tipo Johnson.



TIPO JOHNSON

PUENTECILLO

RANURADA

Figura 7.3.7. Líneas de flujo durante las operaciones de desarrollo mediante inyección de agua desde el interior de la tubería del sondeo.

Las rejillas de tipo Johnson, a la izquierda, son las más apropiadas para las operaciones de desarrollo que requieren de inyección de fluidos. A su vez, son las que presentan menor resistencia mecánica para operaciones de desarrollo frecuentes como el pistoneo. En las rejillas de puentecillo (figura 7.3.7 central) los chorros de inyección chocan contra la tubería. En el caso de las tuberías ranuradas (figura 7.3.7 derecha), se puede comprobar que el flujo inyectado desde el interior sale por las ranuras sin problemas, aunque el porcentaje de área hueca es inferior al de las rejillas Johnson (figura 7.3.7).

Ø Nominal	Ø Externo	Ø Interno	Espesor	Pernos de prueba	Resistencia presión externa	Peso aprox.	Longitudes	Opciones de conexión
DN	"	[mm]	[mm]	[mm]	[bar]	[kg/m]	[m]	
100	41/2	114,3	108,3	3,0	101,0	66,8	8,4	1-2/3/4/6
125	51/2	139,7	133,7	3,0	139,7	36,6	10,3	1-2/3/4/6
150	65/8	168,3	162,3	3,0	154,0	20,9	12,5	1-2/3/4/6
175	75/8	193,7	187,7	3,0	193,7	13,7	14,4	1-2/3/4/7
200	85/8	219,1	213,1	3,0	205,0	9,5	16,3	1-2/3/4/6
250	103/4	273,0	265,0	4,0	256,0	1,6	27,0	1-2/3/4/6
300	123/4	323,9	315,9	4,0	307,0	7,0	32,2	1-2/3/4/6
350	14	355,6	347,6	4,0	339,0	5,3	35,3	1-2/3/4/6
400	16	406,4	396,4	5,0	386,0	6,9	50,4	1-2/3/4/6
500	20	508,0	496,0	6,0	483,0	6,1	75,7	1-2/3/4/6
600	24	609,6	597,6	6,0	586,0	3,5	91,0	1-2/3/4/6
800	32	812,8	796,8	8,0	786,0	3,5	161,8	1-2/3/4/6
1000	40	1016,0	1000,0	8,0	986,0	1,8	202,7	1-2/3/4/6

Tabla 7.3.7. Resistencia a la presión externa y peso por metro lineal de rejilla de filtro puentecillo. (Tomado del catálogo Pesa Well Engineering, S.L.).

Ø Nominal	Ø Ext	Distancia Puente		Capacidad de filtración teórica (v=30mm/s) puente [mm]									
DN	"	[mm]	[mm]	h=1 ; L=23,5		h=1,5;L=24,25		h=2 ; L=25		h=2,5;L=25,75		h=3 ; L=26,5	
				Área abierta	l/s x m	Área abierta	l/s x m	Área abierta	l/s x m	Área abierta	l/s x m	Área abierta	l/s x m
100	4 1/2	114,3	7,5	6,9 %	0,7	10,6 %	1,1	14,5 %	1,5	18,7 %	1,9	23,1 %	2,4
125	5 1/2	139,7	7,5	6,9 %	0,9	10,6 %	1,3	14,5 %	1,8	18,7 %	2,4	23,1 %	3,0
150	6 5/8	168,3	9,0	6,9 %	1,0	10,6 %	1,6	14,5 %	2,2	18,7 %	2,9	23,1 %	3,6
175	7 5/8	193,7	8,0	6,9 %	1,2	10,6 %	1,9	14,5 %	2,6	18,7 %	3,3	23,1 %	4,1
200	8 5/8	219,1	7,5	6,9 %	1,4	10,6 %	2,1	14,5 %	2,9	18,7 %	3,8	23,1 %	4,7
250	10 3/4	273,0	8,5	6,9 %	1,7	10,6 %	2,7	14,5 %	3,7	18,7 %	4,7	23,1 %	5,8
300	12 3/4	323,9	7,5	6,9 %	2,0	10,6 %	3,2	14,5 %	4,3	18,7 %	5,6	23,1 %	6,9
350	14	355,6	9,0	6,9 %	2,3	10,6 %	3,5	14,5 %	4,8	18,7 %	6,2	23,1 %	7,6
400	16	406,4	8,0	6,9 %	2,6	10,6 %	4,0	14,5 %	5,5	18,7 %	7,0	23,1 %	8,7
500	20	508,0	9,0	6,9 %	3,2	10,6 %	5,0	14,5 %	6,9	18,7 %	8,9	23,1 %	10,9
600	24	609,6	?	6,9 %	3,9	10,6 %	6,0	14,5 %	8,2	18,7 %	10,6	23,1 %	13,1
800	32	812,8											
	?	6,9 %	5,2	10,6 %	8,0	14,5 %	11,0	18,7 %	14,1	23,1 %	17,5		
1000	40	1016,0	?	6,9 %	6,5	10,6 %	10,0	14,5 %	13,8	18,7 %	17,8	23,1 %	21,9

Tabla 7.3.8. Caudal teórico de entrada por metro lineal de rejilla de filtro puentecillo con velocidades de 3 cm/s. (Tomado del catálogo Pesa Well Engineering, S.L.).

El filtro de puentecillo consta de una rejilla de pared exterior rugosa que se comercializa con aperturas de 1 a 3 mm y porcentajes de área hueca comprendidos entre el 7 y el 23 %. Es el más empleado en pozos que requieren de la instalación de macizos de grava debido a su elevada resistencia mecánica y a su precio. Su resistencia mecánica según diámetros y grosor se indica en la tabla 7.3.7. Como principal inconveniente se puede indicar que su morfología dificulta la aplicación de métodos de desarrollo que requieran de la inyección de fluido a presión (figura 7.3.7). Los caudales de entrada teóricos de estas rejillas en régimen laminar (con velocidades de menos de 3 cm/s) se indican en la tabla 7.3.8, donde se puede comprobar que están comprendidos entre 0,7 y 22 l/s por metro de rejilla.

Las rejillas ranuradas presentan su pared exterior lisa y su luz de malla suele estar comprendida entre 3 y 6 mm, con porcentajes de área hueca del 14 al 23 %. La elevada apertura de estas rejillas (3 mm) impide su uso cuando se tienen que retener arenas de grano fino, pero su resistencia mecánica es elevada (tabla 7.3.9). Las rejillas ranuradas en fábrica se recomiendan cuando es necesario entubar algunos tramos de sondeos perforados en rocas compactas muy fracturadas y se utilizan en acuíferos granulares para la técnica de filtro natural. Se presentan en la tabla 7.3.10 los caudales de entrada teóricos de estas rejillas en régimen laminar, donde se puede comprobar que están comprendidos entre 1,5 y 22 l/s por metro de rejilla.

Ø Nominal	Ø Externo	Ø Interno	Espesor	Pernos de prueba	Resistencia presión externa	Peso aprox.	Longitudes	Opciones de conexión
DN	"	[mm]	[mm]	[mm]	[bar]	[kg/m]	[m]	
100	41/2	114,3	108,3	3,0	101,0	54,0	8,4	1-7
125	51/2	139,7	133,7	3,0	139,7	30,0	10,3	1-7
150	65/8	168,3	162,3	3,0	154,0	17,1	12,5	1-7
175	75/8	193,7	187,7	3,0	193,7	11,2	14,4	2-7
200	85/8	219,1	213,1	3,0	205,0	7,8	16,3	1-7
250	103/4	273,0	265,0	4,0	256,0	9,5	27,0	1-7
300	123/4	323,9	315,9	4,0	307,0	5,7	32,2	1-7
350	14	355,6	347,6	4,0	339,0	4,3	35,3	1-7
400	16	406,4	396,4	5,0	386,0	5,6	50,4	2-7
500	20	508,0	496,0	6,0	483,0	5,0	75,7	2-7
600	24	609,6	597,6	6,0	586,0	2,9	91,0	3-7
800	32	812,8	796,8	8,0	786,0	2,9	161,8	3-7
1000	40	1016,0	1000,0	8,0	986,0	1,5	202,7	1-7

Tabla 7.3.9. Resistencia a la presión externa y peso por metro lineal de rejilla ranurada en fábrica. (Tomado del catálogo Pesa Well Engineering, S.L.).

Ø Nominal	Ø Ext	Distancia Puente		Capacidad de filtración teórica (v=30mm/s) puente [mm]									
DN	"	[mm]	[mm]	a=3 ; L=40		a=4 ; L=40		a=5 ; L=40		a=6 ; L=35		a=6 ; L=40	
				Área abierta	l/s x m	Área abierta	l/s x m	Área abierta	l/s x m	Área abierta	l/s x m	Área abierta	l/s x m
100	4 1/2	114,3	18,0	14,0 %	1,5	17,0 %	1,8	-	-	-	-	-	-
125	5 1/2	139,7	18,0	14,0 %	1,8	17,0 %	2,2	-	-	-	-	-	-
150	6 5/8	168,3	18,0	14,0 %	2,2	17,0 %	2,6	-	-	-	-	-	-
175	7 5/8	193,7	18,0	14,0 %	2,5	17,0 %	3,1	-	-	-	-	-	-
200	8 5/8	219,1	18,0	14,0 %	2,9	17,0 %	3,5	-	-	-	-	-	-
250	10 3/4	273,0	18,0	14,0 %	3,5	17,0 %	4,3	21,0 %	5,3	-	-	-	-
300	12 3/4	323,9	18,0	14,0 %	4,2	17,0 %	5,1	21,0 %	6,3	-	-	-	-
350	14	355,6	18,0	14,0 %	4,6	17,0 %	5,6	21,0 %	7,0	-	-	-	-
400	16	406,4	18,0	-	-	17,0 %	6,4	21,0 %	7,9	23,0 %	8,7	-	-
500	20	508,0	18,0	-	-	-	-	21,0 %	9,9	23,0 %	10,9	-	-
600	24	609,6	18,0	-	-	-	-	21,0 %	11,9	23,0 %	13	-	-
800	32	812,8											
	18,0	-	-	-	-	-	-	23,0 %	17,4	11,0 %	8,3		
1000	40	1016,0	18,0	-	-	-	-	-	-	23,0 %	21,8	11,0 %	10,4

Tabla 7.3.10. Caudal teórico de entrada por metro lineal de rejilla ranurada en fábrica con velocidades de 3 cm/s. (Tomado del catálogo Pesa Well Engineering, S.L.).

Las rejillas de filtro continuo de tipo Johnson se comercializan con aperturas de malla de 0,25 a 4 mm y porcentajes de área hueca del 5 al 70 %. Son las que pueden fabricarse con mayor porcentaje de área hueca y menor luz de malla. Se trata de alambres de sección triangular soldados helicoidalmente en un armazón longitudinal formado por unas delgadas barras planas. La sección triangular, con su extremo más fino apuntando al interior del tubo, dificulta que los granos de tamaño ligeramente inferior a la luz de malla queden atrapados en la pared de la rejilla. Estas rejillas son más caras que las de puentecillo y que las ranuradas y presentan una menor resistencia mecánica (tabla 7.3.11). No se pueden hincar y no se pueden desarrollar por pistoneo. Sin embargo, se pueden conseguir mayores resistencias mecánicas mediante el uso de rejillas reforzadas, conocidas como rejillas dobles o dúplex, que consisten en una rejilla de apertura continua reforzada en su interior mediante una rejilla ranurada en fábrica, que le proporciona una mayor resistencia al conjunto (ver figura 7.3.8 A). Actualmente están disponibles rejillas continuas de PVC de la casa Stüva (área de paso del 8 al 46 %). Esta rejilla presenta como novedad su transparencia, permitiendo con una cámara poder ver cómo ha quedado colocado el empaque de gravas.

ø Nominal		ø Externo	ø Interno	Varillas	Compresión	Peso aprox	Tipo de Perfil
DN	"	[mm]	[mm]	[mm]	[bar]	[kg/m]	Perfil de Alambre
50	2	60,3	47,2	3,0	246,9	3,5	A
80	3	88,9	75,9	3,0	75,0	4,7	A
100	4½	114,3	95,6	4,0	60,9	8,0	B
125	5½	139,7	126,5	4,0	31,1	9,9	B
150	65⁄8	168,3	146,0	4,0	20,1	11,5	B
175	75⁄8	193,7	180,3	4,0	31,5	17,4	C
200	85⁄8	219,1	198,0	4,0	22,8	19,6	C
250	103⁄4	273,1	250,0	4,0	11,7	24,7	C
300	123⁄4	323,9	300,0	4,0	13,9	36,0	D
350	14	355,6	336,0	4,0	10,2	40,0	D
400	16	406,4	388,5	4,0	12,5	52,6	E
450	18	457,2	435,0	4,0	9,0	58,8	E
500	20	508,0	486,5	4,0	11,3	79,5	F
600	24	609,6	587,0	4,0	6,6	95,6	F
800	32	812,8	777,0	4,0	4,1	147,2	G
1000	40	1016,0	994,0	4,0	2,0	167,7	G

Tabla 7.3.11. Resistencia a la presión externa y peso metro por lineal de rejilla de tipo Johnson. (Tomado del catálogo Pesa Well Engineering, S.L.).

Caudal de agua en v = 30 mm/s (según el tipo de perfil y anchos de ranura en l/seg por metro de sección de filtro)												
Ø Nominal	Ø Ext. Aprox.	Perfil	Tamaño ranuras									
			0,25	0,5	0,75	1	1,5	2	2,5	3	4	
DN	"	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
50	2	60,3	A	0,7	1,2	1,6	1,9	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7
80	3	88,9	A	1,0	1,7	2,4	2,9	3,7	4,2	4,7	5,0	5,6
100	4½	114,3	A	1,2	2,2	3,0	3,6	4,6	5,4	5,9	6,4	7,0
100	4½	114,3	B	1,1	2,0	2,8	3,4	4,4	5,1	5,7	6,2	6,9
125	5½	139,7	A	1,6	2,8	3,8	4,6	5,8	6,8	7,5	8,0	8,9
125	5½	139,7	B	1,4	2,5	3,5	4,2	5,5	6,4	7,2	7,7	8,6
150	65/8	168,3	A	1,8	3,2	4,4	5,3	6,8	7,9	8,7	9,3	10,3
150	65/8	168,3	B	1,6	2,9	4,0	4,9	6,3	7,4	8,3	9,0	10,0

Caudal de agua en v=30 mm/s (según el tipo de perfil y anchos de ranura en l/seg por metro de sección de filtro)												
Ø Nominal	Ø Ext. Aprox.	Perfil	Tamaño ranuras									
			0,25	0,5	0,75	1	1,5	2	2,5	3	4	
DN	"	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
150	65/8	168,3	C	1,4	2,5	3,5	4,3	5,7	6,7	7,6	8,3	9,4
175	75/8	193,7	B	1,9	3,5	4,7	5,8	7,5	8,8	9,8	10,6	11,8
175	75/8	193,7	C	1,6	2,9	4,1	5,1	6,7	7,9	8,9	9,8	11,0
200	85/8	219,1	B	2,1	3,9	5,3	6,5	8,3	9,8	10,9	11,8	13,4
200	85/8	219,1	C	1,8	3,3	4,5	5,6	7,4	8,8	9,9	10,9	12,3
200	85/8	219,1	D	1,5	2,8	3,9	4,9	6,5	7,9	9,0	9,9	11,4
200	85/8	219,1	E	1,4	2,7	3,8	4,7	6,4	7,7	8,8	9,7	11,2
200	85/8	219,1	F	1,3	2,4	3,5	4,4	6,0	7,3	8,4	9,3	10,8
250	103/4	273,0	B	2,7	4,8	6,6	8,1	10,4	11,2	13,6	14,8	16,4
250	103/4	273,0	C	2,2	4,1	5,7	7,0	9,3	11,0	12,4	13,6	15,3
250	103/4	273,0	D	1,9	3,5	4,9	6,1	8,2	9,8	11,2	12,4	14,2
250	103/4	273,0	E	1,8	3,3	4,7	5,9	7,9	9,6	10,9	12,1	14,0
250	103/4	273,0	F	1,6	3,0	4,3	5,4	7,4	9,0	10,4	11,5	13,4
300	123/4	323,9	C	2,6	4,8	6,7	8,3	11,0	13,0	14,7	16,1	18,2
300	123/4	323,9	D	2,2	4,1	5,7	7,2	9,6	11,6	13,3	14,6	16,8
300	123/4	323,9	E	2,1	3,9	5,5	6,9	9,3	11,3	12,9	14,3	16,5
300	123/4	323,9	F	1,9	3,6	5,1	6,4	8,7	10,6	12,2	13,6	15,8
300	123/4	323,9	G	1,6	3,0	4,3	5,4	7,5	9,2	10,7	12,1	14,2
350	14	355,6	D	2,4	4,5	6,3	8,0	10,7	12,9	14,7	16,2	18,6
350	14	355,6	E	2,3	4,3	6,1	7,7	10,3	12,5	14,3	15,8	18,2
350	14	355,6	F	2,1	4,0	5,6	7,1	9,6	11,7	13,5	15,0	17,4
350	14	355,6	G	1,7	3,3	4,7	6,0	8,3	10,2	11,9	13,3	15,7
400	16	406,4	D	2,8	5,2	7,3	9,1	12,3	14,8	16,8	18,6	21,3
400	16	406,4	E	2,6	5,0	7,0	8,8	11,8	14,3	16,4	18,1	20,9
400	16	406,4	F	2,4	4,5	6,4	8,1	11,0	13,4	15,5	17,2	20,0
400	16	406,4	G	2,0	3,8	5,4	6,9	9,5	11,7	14,6	15,3	18,0
450	18	457,0	E	3,0	5,5	7,8	9,8	13,2	16,0	18,3	20,3	23,4
450	18	457,0	F	2,7	5,1	7,2	9,1	12,3	15,0	17,3	19,2	22,3
450	18	457,0	G	2,2	4,2	6,0	7,7	10,6	13,0	15,2	17,0	20,1
500	20	508,0	F	3,0	5,6	8,0	10,1	13,7	16,7	19,2	21,3	24,8
500	20	508,0	G	2,5	4,7	6,7	8,5	11,7	14,5	16,9	18,9	22,3
600	24	609,6	G	2,9	5,6	8,0	10,2	14,0	17,3	20,1	22,6	26,7
800	32	812,8	G	3,8	7,3	10,4	13,3	18,4	22,7	26,4	29,6	34,9
1000	40	1016	G	4,9	9,2	13,2	16,9	23,2	28,7	33,4	37,4	44,2

Tabla 7.3.12. Caudal teórico de entrada por metro lineal de rejilla de tipo Johnson con velocidades de 3 cm/s. (Tomado del catálogo Pesa Well Engineering, S.L.).

En la tabla 7.3.12 se presentan los caudales que pueden proporcionar las rejillas Johnson, en condiciones de régimen laminar. Estos caudales están comprendidos entre 0,7 y 44 l/s por metro de rejilla.

En ocasiones se debe recurrir al uso de rejillas especiales. Es el caso de las rejillas con un tubo base de PVC con alto porcentaje de área hueca que se recubren en su pared exterior con un macizo de arena pegado con resina (figura 7.3.8 B). Cuando se utilizan estas rejillas se asegura que la colocación del prefiltro de grava o arena se hace a una profundidad determinada dado que va adherido al tubo. Además, el calibre de los granos de grava o arena que se enfrenta a la rejilla es el óptimo, por eso

estas son las rejillas recomendadas para retener formaciones de arena fina. Se emplean, también, cuando se trabaja en regiones remotas, en las que es complejo conseguir prefiltros de grava o arena. Este tipo de rejilla es también muy utilizada para el encamisado interior de pozos en los que se ha producido un deterioro de la rejilla o de la tubería de revestimiento. La rigidez de la grava o la arena, al estar pegada al tubo, dificulta las operaciones de desarrollo y de mantenimiento. Esta es su principal desventaja.

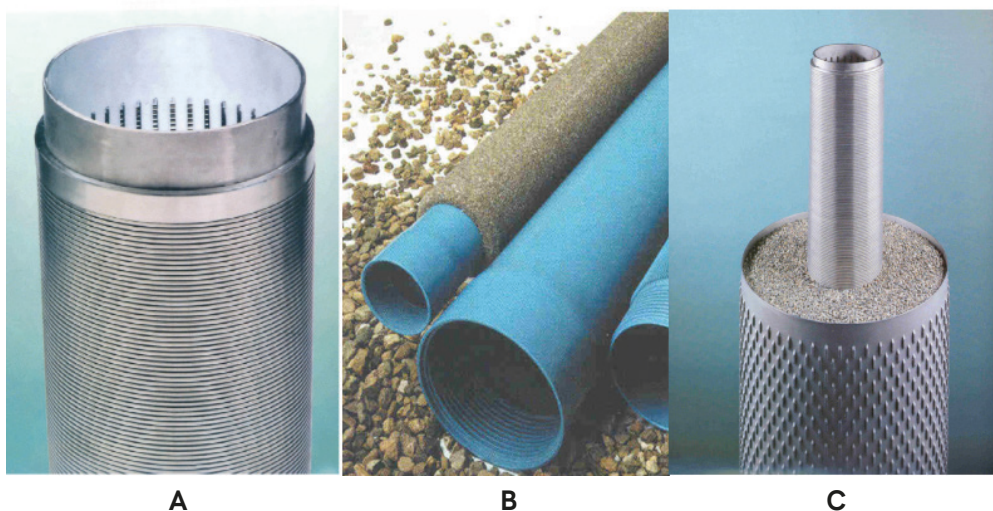


Figura 7.3.8. Rejillas especiales. A) Rejilla doble. Rejilla con tubo base de PVC; B) macizo de arena pegado con resina. C) Rejilla doble con macizo de arena incorporado.

Por último, en la figura 7.3.8 C se presenta otra rejilla doble en la que el macizo de arena se incorpora en el anular comprendido entre las dos tuberías. Este tipo de tubería solo se utiliza cuando es muy difícil colocar el macizo de grava o arena a una profundidad determinada. El peso es considerable, por lo que es necesario conocer muy bien la capacidad de tracción de las rejillas. Por otro lado, la rejilla interior, que suele ser de apertura continua, no se puede limpiar y mantener con métodos de inyección a presión si no tiene más de 150 mm de diámetro.

En todo caso, a continuación se realizan una serie de consideraciones que deben ser tenidas en cuenta antes de elegir un determinado tipo de rejilla.

1. La rejilla es la parte más débil desde el punto de vista mecánico de la columna de entubación. Como norma general se admite que en tubos con menos del 15 % de área abierta se reduce la resistencia en un 20 %. Cuando el área hueca es mayor del 15 % se llega a reducir la resistencia con respecto a un tubo ciego de las mismas características en un 40 %.
2. La resistencia físico-química de la tubería debe ser considerada cuando se pretenden explotar aguas corrosivas o incrustantes. Según el tipo de agua, se deberá utilizar una rejilla compuesta por un material apropiado. Además, cuando se utilizan rejillas metálicas, su composición debe ser igual a la de la tubería ciega para evitar procesos de corrosión galvánica. En el caso de tuberías de acero inoxidable las zonas afectadas por soldaduras pierden sus propiedades y se pueden formar incrustaciones.
3. La rejilla que se instale en un pozo debe tener un diseño que permita la realización de las operaciones de desarrollo planificadas en la fase de diseño del pozo.
4. Desde el punto de vista hidráulico no tiene sentido utilizar rejillas con más de un 20 % de zona ranurada, dado que valores del 5 al 10 % son suficientes. Sin embargo, siempre es conveniente tener en cuenta que el 50 % del área hueca de una tubería suele quedar ocluida durante su vida útil, por lo que es recomendable utilizar rejillas que tengan el doble del área hueca requerida hidráulicamente.

5. En pozos que van a ser explotados de forma continuada no es conveniente instalar rejillas de menos de 150 mm de diámetro interior. Si estas tienen que limpiarse regularmente desde el interior, mediante inyección de agua a presión o con otros dispositivos, requieren de ese diámetro mínimo. Tampoco es conveniente colocar rejillas con diámetros por encima de los 300 mm, dado que se pierde mucha resistencia mecánica y los incrementos de caudal son poco significativos. Los caudales que pueden penetrar en las rejillas, en régimen laminar, se han indicado en las tablas 7.3.8, 7.3.10 y 7.3.12.
6. La posición de las zonas filtrantes de un pozo depende del tipo de acuífero (libre, confinado, semiconfinado o multicapa) y de su espesor. En ese sentido, se recomienda seguir las indicaciones que se presentan en el capítulo 4 de esta guía. En todo caso, se debe evitar que la rejilla quede colocada por encima de la zona saturada del acuífero. Los filtros de un sondeo siempre deben estar sumergidos en agua.
7. La distribución del área hueca de las rejillas en la inmensa mayoría de los casos se realiza de forma homogénea, sin embargo, en pozos de gran caudal y que van a ser sometidos a una explotación constante se pueden utilizar configuraciones diferentes que permiten contrarrestar la tendencia a concentrar el flujo en las rejillas más próximas a la bomba. En la figura 7.3.9 A se presenta un esquema de flujo en el que se observa cómo las líneas de flujo en las zonas más alejadas de la bomba se orientan paralelamente al eje del pozo, provocando una componente de flujo vertical en el propio prefiltro, para pasar a penetrar la mayor cantidad de agua en la zona de rejillas más próxima a la bomba.

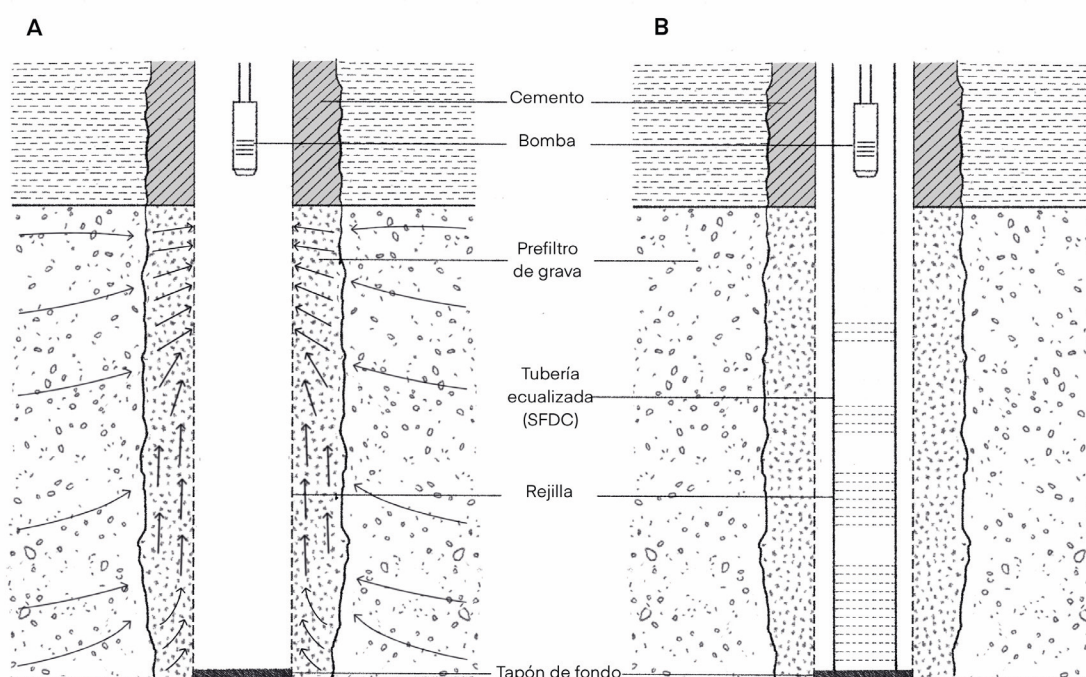


Figura 7.3.9. A) Esquema de flujo en el entorno de la rejilla de un pozo en explotación con una bomba colocada por encima de la rejilla. B) Esquema de distribución de las aperturas de rejilla según el sistema SEF.

Esta técnica, que se conoce como ecualización, contrarresta el patrón asimétrico de flujo y crea un flujo horizontal y laminar que reduce las pérdidas de carga por la turbulencia y reduce la velocidad de entrada. Estos cambios favorecen la reducción de los procesos de incrustación y corrosión de la rejilla. El sistema conocido como SFDC (*Suction Flow Control Device*) o en español SEF (Sistema de Ecuilización del Flujo) consiste en encamisar interiormente un pozo con una tubería plástica que tiene una distribución calculada del área abierta. En estos equipos, que

suelen estar contruidos en PVC, el porcentaje de área hueca se distribuye según la posición y el caudal relativo de los diferentes tramos productivos y se reduce en las zonas próximas a la aspiración de la bomba (figura 7.3.9 B). Con esta disposición se compensa el efecto de concentración del flujo en la zona de rejilla más próxima a la bomba.

8. Por último, se quiere recalcar que la luz de paso debe ser acorde a la granulometría del macizo de arena o prefiltro a instalar, o a la granulometría de la formación cuando no se coloca prefiltro. Esta cuestión se trata en el epígrafe 7.4 dedicado al prefiltro o macizo de grava.

7.3.4. Instalación de la columna de entubación

El descenso de la columna de entubación de un pozo es una operación que debe realizarse con especial cuidado.

Antes de empezar a entubar el pozo se recomienda realizar las siguientes comprobaciones:

1. Estado del material suministrado.

La tubería debe ser revisada antes de ser colocada en el pozo. Hay que solicitar y revisar los certificados de calidad, medir la longitud y el espesor de los tubos, comprobar su estado para descartar la presencia de perforaciones o deformaciones, verificar la limpieza de los tubos y proceder a su desinfección, previa a su instalación, en el caso de que sean tubos para un pozo de abastecimiento.

Si la tubería va unida mediante soldadura, se debe comprobar que todos los tubos están biselados según las especificaciones de la dirección de obra. Si los tubos van unidos mediante rosca se debe comprobar su estado. Es conveniente que las tuberías vengán protegidas hasta la obra mediante un tapón, una funda de plástico, o paletizadas.



Figura 7.3.10. Operación de descenso de una tubería metálica unida mediante rosca. Autor: Juan Antonio Hernández Bravo

2. Repasar la perforación y disminuir la densidad del lodo.

Antes de entubar un pozo hay que extraer la sarta de perforación y descenderla de nuevo hasta el final del pozo. Con esta operación se puede comprobar si se ha producido algún desprendimiento de la pared del pozo, que impida el descenso de la columna de entubación. En caso de existir atra-

ques, se deben reperforar esos tramos hasta conseguir el descenso de la sarta de perforación sin que esta roce contra la pared del sondeo.

Si el sondeo se ha perforado con circulación directa es conveniente disminuir la densidad del lodo.

3. Comprobar la verticalidad y la alineación del sondeo.

Para que un sondeo pueda ser entubado se requiere que esté construido con una desviación tolerable. Para comprobar la verticalidad y la alineación de los sondeos conviene hacer una testificación con una sonda geofísica específica para su medida. En caso de no haberse hecho la diagráfía, se debe proceder a suspender un tubo de 12 m de longitud con un diámetro inferior al de perforación según se indica en el epígrafe 7.2.5 de esta guía. Si el tubo desciende sin encontrar obstáculos y sin rozar con la pared hasta el final de donde se pretende acondicionar la cámara de bombeo, no existirán problemas a este respecto.

La operación de entubado debe ser continua y sin paradas, en especial en las captaciones construidas en materiales no consolidados. Se debe realizar una programación adecuada para evitar extender en demasía la jornada de trabajo, dado que esta no puede finalizar hasta que no acabe la operación.

El descenso de tuberías roscadas, tanto si son metálicas como de PVC, se debe hacer con la ayuda de una mesa de entubación y con las correspondientes cuñas de sujeción (figuras 7.3.10 y 7.3.12). Hay que conocer la capacidad de tracción de la rosca, para saber qué columna de entubación es capaz de soportar.

Es preferible que la unión entre tubos roscados no tenga recalque externo (figura 7.3.11 B), es decir que estos tubos no estén abocardados. De esta forma se evita la formación de puentes cuando se coloca el macizo de grava, entre la tubería y la pared de la perforación. En caso de tener que recurrir a tubos cuya rosca requiere un recalque externo (figura 7.3.11 A), dado que estas roscas tienen una mayor capacidad de tracción, será recomendable disponer de una distancia mínima de 80-100 mm entre la pared de la perforación y el exterior del tubo, para poder colocar con facilidad el macizo de grava correspondiente.

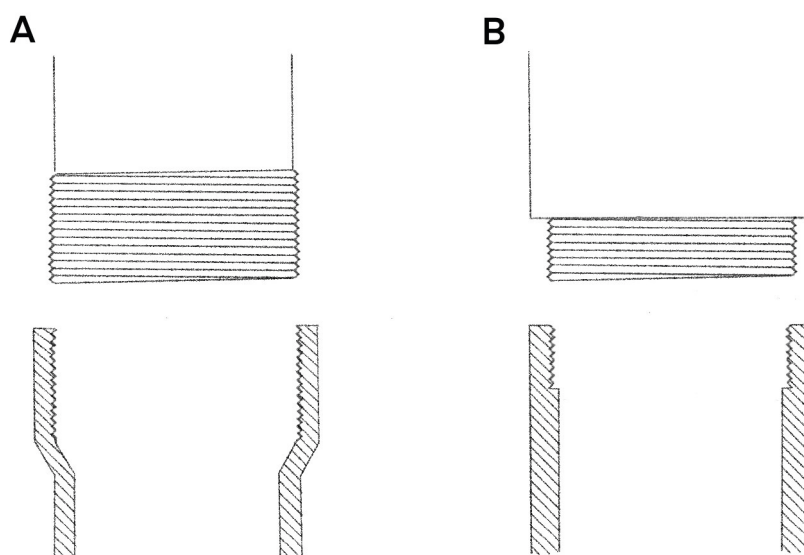


Figura 7.3.11. Uniones roscadas de tubos para pozos de agua subterránea. A) Con recalque externo. B) Sin recalque externo.

Los tubos metálicos unidos mediante soldadura deben estar biselados (con 45°), preferiblemente en sus dos bordes, para alojar el cordón de soldadura continuo en el hueco, sin generar un recalque externo (figura 7.3.12).

El descenso de la tubería debe realizarse mediante su sujeción con una abrazadera, que se deberá colocar por debajo de los topes de sujeción de los tubos. Durante el proceso de soldadura, la columna de entubación deberá quedar acuada a la mesa de entubación (figura 7.3.12) y con la base de mordazas hidráulicas de la máquina.

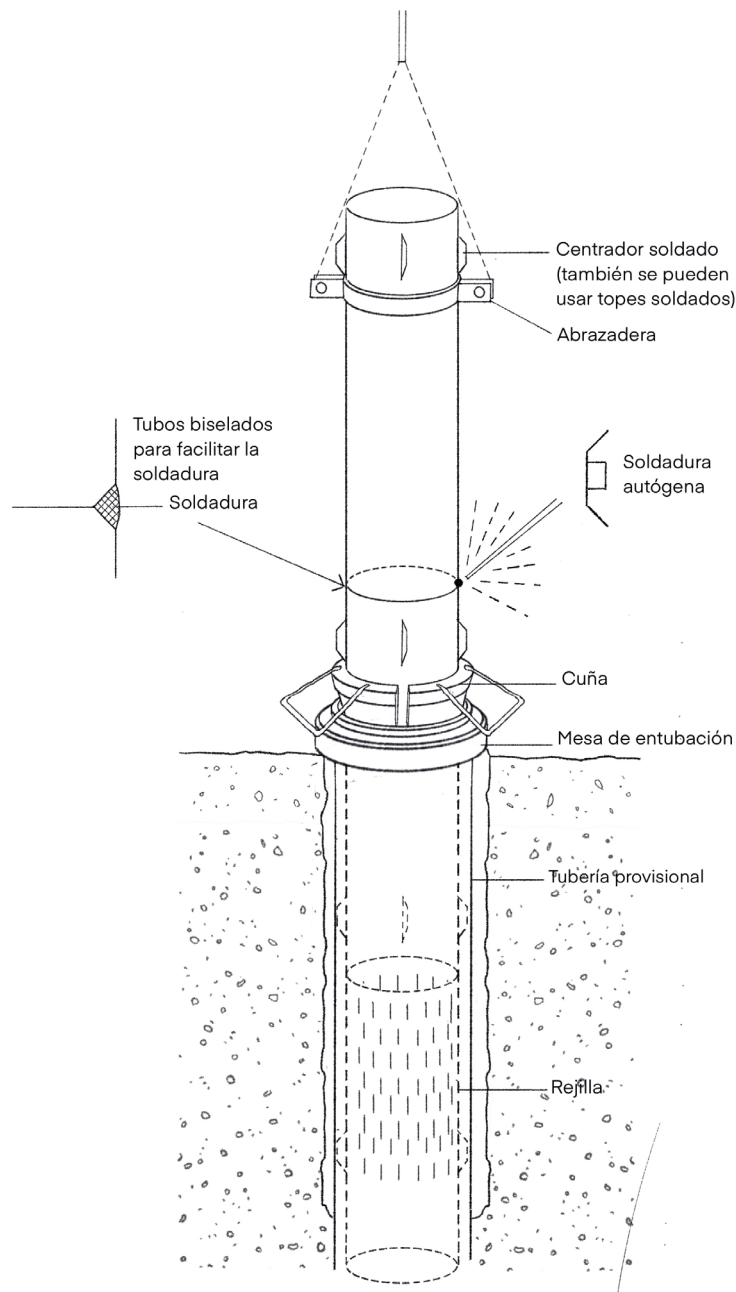


Figura 7.3.12. Descenso de una columna de entubación de tubería metálica unida mediante soldadura (modificado de Bayó, 1996).

No se debe permitir el descenso de tubería metálica mediante el método de la barra pasante y perforaciones. La barra pasante se pasa por unas "orejeras" cortadas en la tubería que luego han de cerrarse mediante soldadura y que pueden quedar con poros abiertos por donde puede entrar el agua de horizontes acuíferos, colgados o no, que debían estar aislados. Es necesario garantizar la estanqueidad del entubado ante intrusiones externas y reducir al máximo actuaciones innecesarias que contribuyan a reducir la resistencia mecánica y química de la tubería.

Si se necesita la instalación de un macizo de grava o la cementación del anular de la perforación hay que instalar centradores. Estos se pueden colocar dispuestos a 120 grados o a 90 grados o alternando, y a una distancia de 6 m (figura 7.3.13). A este respecto se debe indicar que existen multitud de modelos en el mercado, tanto para tuberías metálicas como de PVC, de diversos materiales y configuraciones.

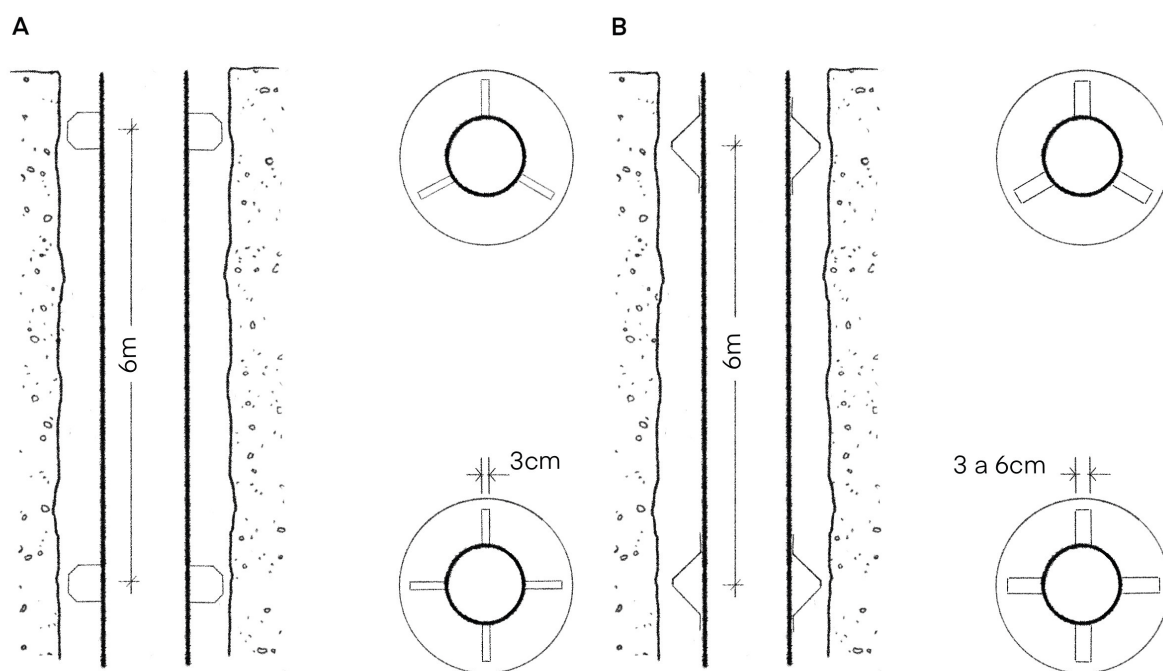


Figura 7.3.13. Recomendaciones del uso de centradores en pozos que requieren de cementaciones o de la colocación de macizo de grava.

Para mejorar la verticalidad de las columnas de entubación de los pozos, que requieren la colocación de macizo de grava o prefiltro, conviene colocar la tubería suspendida desde la superficie o en una de las reducciones del pozo. Se evitan de este modo los pandeos que se generan al apoyar la entubación en el fondo de la perforación y el aplastamiento de las zonas de rejilla, por el peso de la columna de entubación. Si la tubería queda suspendida debe colocarse un tapón de fondo que impida la entrada de grava en el interior del pozo.

7.4. Macizos de grava

7.4.1. Introducción

Los sondeos que captan formaciones acuíferas no consolidadas requieren en la mayoría de los casos de la colocación de un prefiltro (empaquete, macizo) de grava. Este prefiltro consiste en un relleno de grava calibrada que se coloca en el anular del sondeo que queda entre la rejilla y la pared del taladro (figura 7.4.1).

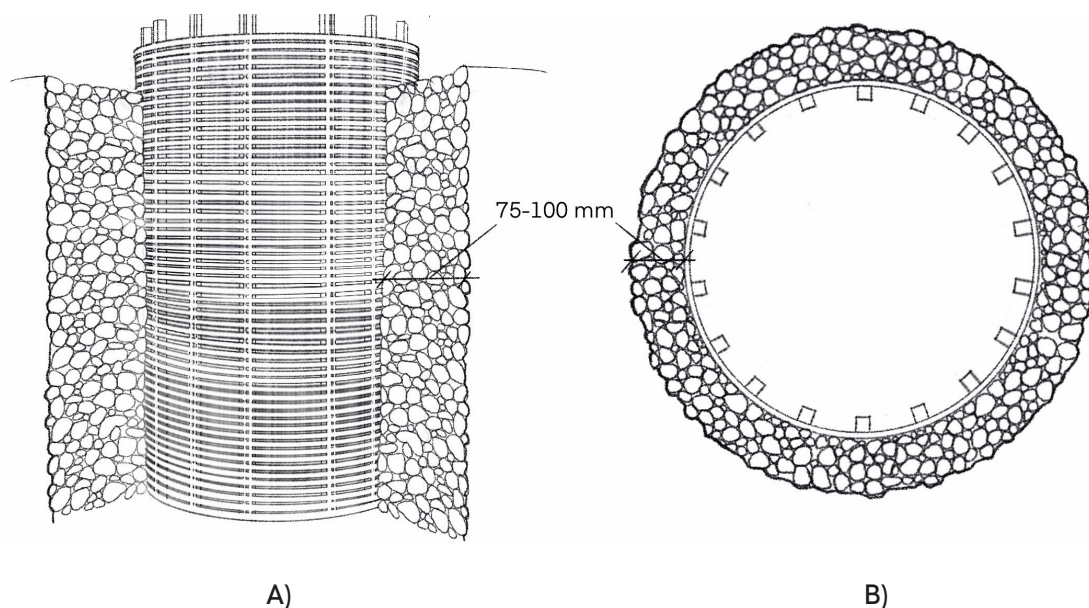


Figura 7.4.1. A) Sección lateral del tramo de un pozo con una rejilla de apertura continua enfrente a un macizo de grava. B) Sección del pozo con indicación del espesor recomendado para macizos de grava en pozos de explotación de agua subterránea.

La grava debe ser lo más redondeada posible, con superficie lisa, de composición generalmente silíceas, con cierto grado de uniformidad y debe haber sido lavada con agua dulce libre de contaminantes. Es necesario recalcar que su composición debe ser silíceas. Un 5 % de grava carbonatada en un macizo neutraliza gran cantidad del ácido que se suele inyectar en los pozos durante las operaciones de mantenimiento de tuberías y rejillas e incluso dificulta las operaciones de desarrollo. Recientemente se están incorporando al mercado gravas silíceas artificiales totalmente esféricas, desarrolladas por la industria petrolera, que se fabrican con el diámetro y el grado de uniformidad requerido (figura 7.4.2).



GRAVA NATURAL

GRAVA ARTIFICIAL

Figura 7.4.2. Detalle de una grava silícea natural y una grava artificial

Las aberturas de las rejillas convencionales no son lo suficientemente pequeñas para retener las arenas finas de las formaciones geológicas perforadas, por lo que estas arenas pueden penetrar en el pozo rellenándolo, además de dañar las bombas y colmatar tuberías de distribución y depósitos. Por esta razón, cuando la granulometría de la formación acuífera que se quiere captar está comprendida entre 0,05 y 2 mm, es decir, en el caso de las arenas, hay que recurrir necesariamente a colocar un macizo o prefiltro de grava (figura 7.4.3 A).

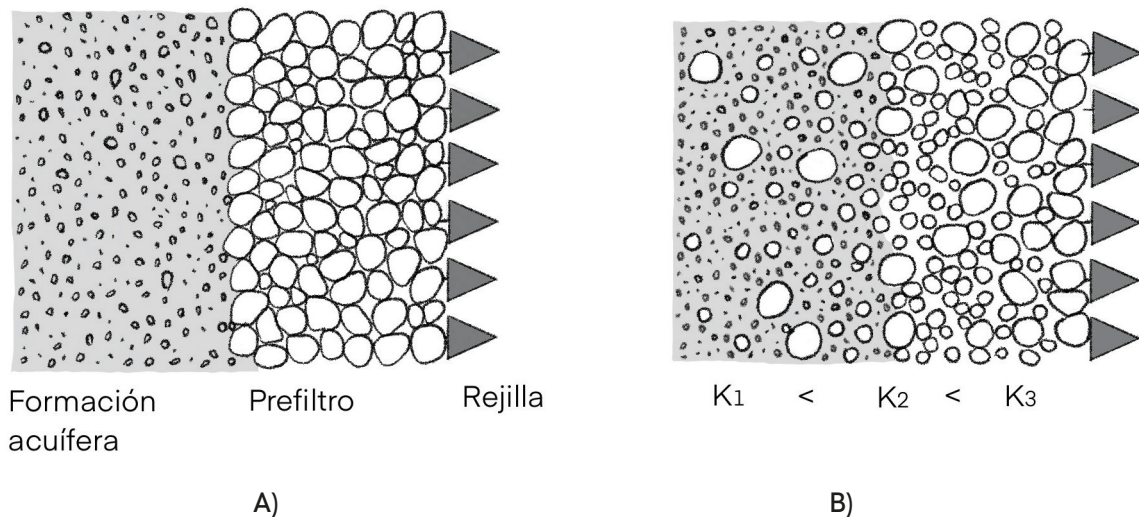


Figura 7.4.3. A) Detalle de un prefiltro de grava que impide la entrada de granos finos en el pozo y que estabiliza su pared. B) Detalle de un pozo perforado en gravas y sin prefiltro de grava, en el que se ha colocado una rejilla adecuada al tamaño de grano de la formación y se ha realizado un desarrollo que ha aumentado la porosidad y la permeabilidad en el entorno del pozo.

De este modo, es necesario colocar un macizo de grava en los sondeos de explotación de aguas subterráneas en los que durante su testificación geológica se presentan tramos con:

1. Arenas finas uniformes.
2. Niveles de gravas con un elevado porcentaje de arena fina.
3. Areniscas pobremente cementadas.
4. Acuíferos multicapa con niveles delgados de arenas embebidos en limos o en arcillas.

Asimismo, a veces, el diseño constructivo de un sondeo puede requerir de la colocación de un empaque de grava en el anular, sobre el que se pretende hacer una cementación para aislar un acuífero o para cementar el cabezal de la captación.

Si el tamaño de grano de la formación acuífera es mayor de 2 mm (gravas) no hace falta colocar un prefiltro, con una rejilla que tenga una apertura con un tamaño del 80 % del tamaño de la grava a retener y con un desarrollo adecuado, el sondeo quedará bien terminado (figura 7.4.3 B).

Cuando el tamaño de grano de la formación geológica perforada es menor de 0,05 mm se está en el campo de los limos y no interesa la explotación de estos niveles dada su baja permeabilidad y la turbidez que confieren al agua. En este caso se recomienda colocar un tubo ciego frente a estos tramos limosos.

La instalación de un empaque de gravas, además de retener la penetración de granos de arena, limos, arcillas o cualquier tipo de partícula, persigue reducir las pérdidas de carga que se producen al penetrar el agua en un sondeo. Cuando se bombea agua, la sección de paso del cono de bombeo se hace menor conforme se reduce la distancia al eje del pozo, por lo que si el caudal de bombeo

es constante la velocidad del agua aumenta. Si esta supera los 3 cm/s pasa a circular en régimen turbulento, haciendo aumentar de forma exponencial las pérdidas de carga. Pero, además, cuando el agua llega al pozo, se encuentra una rejilla que solo está abierta entre un 5 y un 10 % de la superficie total de la tubería, en el mejor de los casos (figura 7.4.4). La instalación de un prefiltro de grava permite disponer de un mayor porcentaje de huecos en el sentido radial, aumentando desde la formación acuífera hacia la tubería filtrante del sondeo. Se consigue, por tanto, una clasificación gradual creciente de los tamaños de grano conforme menor es la distancia a la tubería filtrante del sondeo (figura 7.4.3), contrarrestando el citado aumento de velocidad.

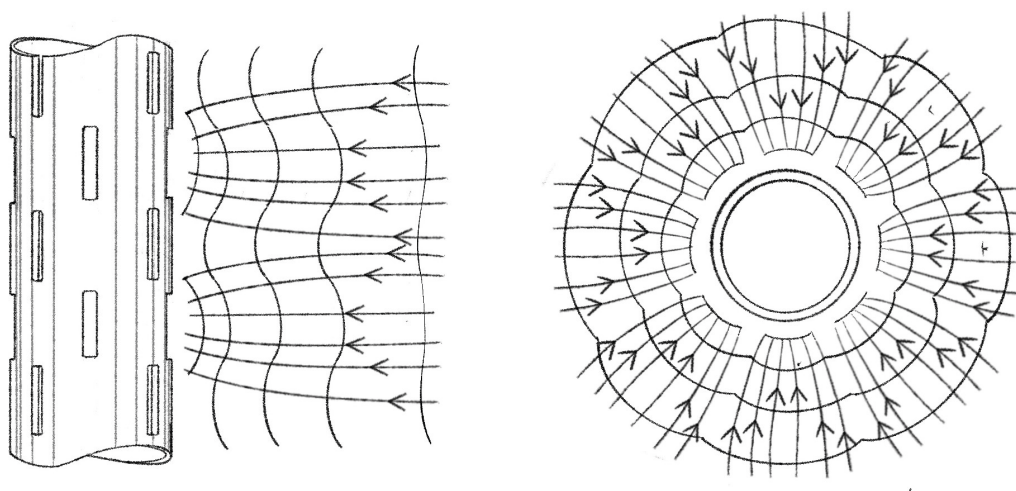


Figura 7.4.4. Trayectorias y velocidad del agua en el entorno de un pozo entubado con rejilla de puentecillo.

7.4.2. Dimensionado de prefiltros de grava en sondeos con formaciones acuíferas arenosas

Para dimensionar el calibre de las gravas del prefiltro se debe conocer la granulometría de la formación acuífera a retener. La determinación de los tamaños de grano y de su distribución porcentual de una muestra se realiza mediante los análisis granulométricos. El procedimiento para realizar este tipo de análisis se puede consultar en cualquier manual de geotecnia. En esencia, consiste en hacer pasar la muestra por un juego de tamices superpuestos en la vertical de mayor a menor tamaño de apertura de malla. Los granos que quedan retenidos en cada malla se pesan y se pasan a tanto por ciento, representándose el porcentaje de peso retenido de forma acumulada frente a la apertura de los tamices en un gráfico semilogarítmico. Este tipo de gráficos permite, a primera vista, determinar el grado de homogeneidad de una muestra y sus granulometrías (figura 7.4.5).

Si es posible disponer de esos análisis granulométricos se puede proceder a aplicar distintos métodos de selección de la granulometría de la grava (Bayó, 1999; Custodio y Llamas, 1983; Driscoll, 1986; Villanueva, 2006), aunque todos concluyen con resultados similares (Stow, Nold, Johnson, Kruse, Minnesota, Bieske, etc). En todo caso, cuando se testifica un sondeo perforado en materiales detríticos se deben analizar con bastante detalle las muestras que presentan arenas con tamaño de grano fino.

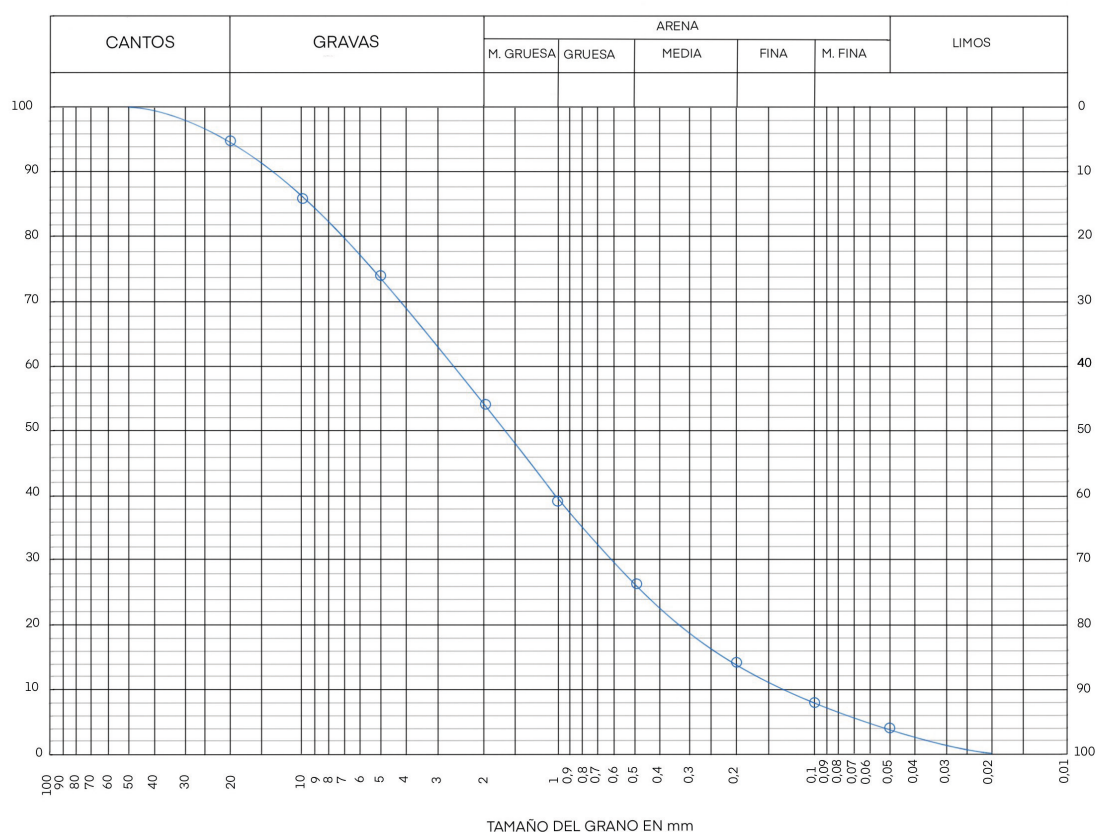


Figura 7.4.5. Representación gráfica de un análisis granulométrico.

En la tabla 7.4.1 se hacen una serie de recomendaciones sobre el tipo de rejilla y paso a instalar en función del reconocimiento *de visu* de la muestra. En esta tabla, realizada por el profesor Alfonso Bayó (Bayó, 1999), se dan unas recomendaciones sobre el tipo de rejilla y de prefiltro que se debe instalar en un sondeo perforado en materiales detríticos, en función del reconocimiento del detritus realizado durante la fase de perforación del sondeo. Esta tabla es de gran utilidad para los no expertos, dado que permite agilizar la toma de decisiones. Se debe tener en cuenta que, en la mayoría de los casos, cuando se perforan pozos de menos de 100 o 200 m de profundidad en materiales detríticos y no se dispone de un equipo para hacer el análisis granulométrico a pie de obra, suele ocurrir que el sondeo está terminado antes de que lleguen los resultados del análisis granulométrico.

Para conocer la granulometría que debe tener un prefiltro de grava, Ruiz-Celaá (Villanueva, 2006) determinó la relación existente entre tres esferas de igual tamaño colocadas en estrella y la esfera tangente a las tres que quedaba entre ellas. Comprobó que la esfera que quedaba entre las tres es 6,464 veces más pequeña que las otras, por lo que, como en la realidad los granos no son totalmente esféricos, puede admitirse que:

$$\varnothing \text{ diámetro mínimo de la grava del prefiltro} = 6 \times \varnothing \text{ diámetro de la arena a retener}$$

En la literatura inglesa se utiliza el índice GpR (*Gravel - pack-ratio*) como el cociente entre el percentil 50 (d50) de la grava del prefiltro y el d50 de la formación acuífera en la curva granulométrica. Los pozos con un macizo de gravas bien diseñado tienen un GpR comprendido entre 4 y 6. Si el GpR está comprendido entre 7 y 10 la eficiencia es menor y si es mayor de 10 el pozo comienza a producir arenas.

Granulometría del acuífero	Aspecto visual	Aspecto a la lupa	Espesor del prefiltro	Diámetro grano del prefiltro	Tipo de rejilla y paso	Observaciones
Arenas finas a medias 0,06 a 0,2 mm	Uniformes y homométricas. Vuelan al soplar.	Redondeadas y suaves al tacto.	Óptimo doble anillo 15-20 mm.	1-2 mm.	PR: 0,5-1 mm MAPR AC P RD	Las rejillas con macizo de arena pegado suelen ser la única solución. No usar bentonita en la perforación en este tipo de medios y rejillas
		Angulosas y rugosas al tacto.	80 mm granulometría más gruesa.	2-3 mm.		
Arenas gruesas 0,6 a 2 mm	Bastante uniformes, se distinguen los granos visualmente. Poco heterométricas.	Redondeadas y suaves al tacto.	80-100 mm.	3-5 mm.	R, AC, P PR: 1-2 mm	Si abundan las arenas finas dar espesor al prefiltro. Preferible el uso de los lodos no bentoníticos
		Angulosas y rugosas al tacto.		5-8 mm.	R, AC, P PR: 3 mm	
Grava y gravillas mezcladas con arena 6 a 60 mm de gravas con 0,2 a 2 mm de arenas	>1/3 en volumen tamaño gravilla o grava, moderadamente heterométricas.	Fracción arenosa suave y redondeada.	80 mm.	6-12 mm.	R, AC, P PR: 3 mm	Instalación del prefiltro con tubos engravadores y métodos de inyección. Evitar el puenteo y asegurarse del asentamiento del prefiltro.
		Fracción arenosa rugosa y angulosa.		6-18 mm.	R, AC, P PR: 3-5 mm	
Gravas medias y gruesas predominando sobre la fracción arenosa > 20 mm	> ½ volumen de tamaño grava o superior. Muestras heterométricas.	Angulosas, aplanadas. Redondeadas o poco aplanadas.	En general, no procede prefiltro.	20-40 mm redondeada.	R, AC, P PR: 5-10 mm	Medios ideales para desarrollo natural con sistemas bidireccionales
			Desarrollo natural.	Sólo rellenar el espacio si el espacio anular es excesivo.		

Tabla 7.4.1. Espesor, diámetro de prefiltro y tipo de rejilla y paso recomendados en función de la granulometría reconocida a visu. PR, paso de rejilla; MAPR, macizo de arena pegada con resina a la rejilla; AC, apertura continua; P, rejilla de puentecillo; RD, rejilla doble con macizo incorporado (Bayó, 1999).

De este modo se debe conocer el diámetro de la arena que se quiere retener y se multiplica por seis para saber el diámetro mínimo de la grava del prefiltro. Pero la grava no es de un tamaño uniforme y se admite que el rango del diámetro de la grava varíe entre el mínimo y el doble del mínimo. Como ejemplo, para retener una arena de 0,25 mm necesitamos una grava con un diámetro mínimo de 1,5 mm y máximo de 3 mm.

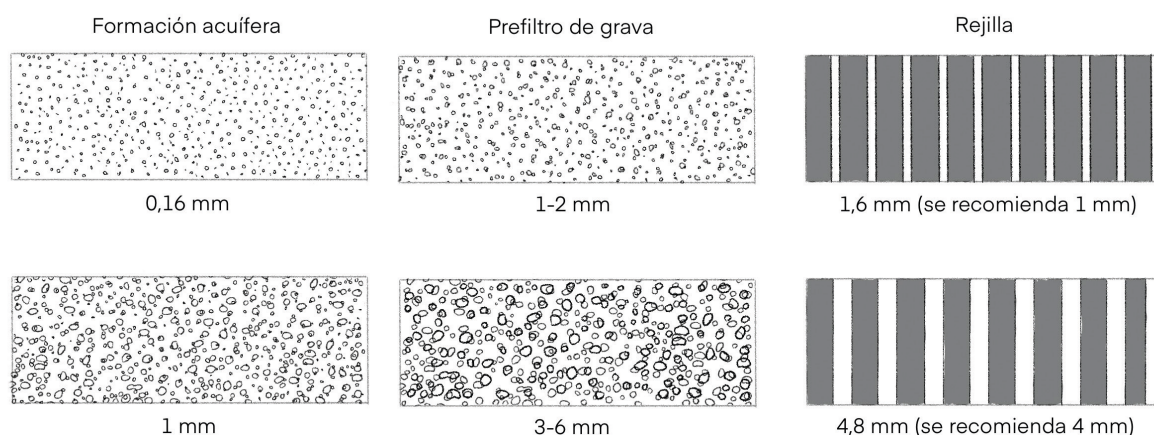


Figura 7.4.6. Relación entre el tamaño de grano de la formación acuífera a retener, el macizo de grava necesario y la apertura de rejilla adecuada de la tubería.

Por su parte, para saber la apertura de la rejilla se debe multiplicar el diámetro máximo de la grava por 0,8 y seleccionar la apertura comercial más próxima al valor obtenido. En la figura 7.4.6 se han representado estas relaciones para dos ejemplos de formaciones arenosas.

Si disponemos de la curva granulométrica podemos ver el porcentaje de muestra que pasaría por los poros del prefiltro durante la fase de desarrollo, para analizar si es una cantidad de material muy importante. Si se tiene el análisis representado en la figura 7.4.5 y se quiere retener una arena de 0,25 mm con una grava 1,5-3 mm, se puede comprobar que un 16 % de los granos penetrarían en el pozo, porcentaje que se considera admisible. Es recomendable que la granulometría del macizo de grava no permita que entre más de un 30 % de los granos en formaciones muy heterométricas.

Conocida la granulometría se requiere conocer el espacio anular mínimo que debe tener un macizo de grava. En los principales manuales de construcción de pozos se recomienda que esté comprendido entre 75 y 100 mm, es decir que la diferencia de diámetros entre la perforación y el filtro sea al menos de 150 mm. Los tubos para engravillar deben tener entre 2 y 3" de diámetro para que la grava descienda bien por su interior. Si se van a utilizar tubos de 3" se debe prever un espacio en el anular, suficiente para el paso de dichos tubos, y no inferior a 90 mm.

Para el cálculo de la cantidad de grava necesaria se aplica la siguiente fórmula:

$$V = h \pi (R^2 - r^2),$$

donde:

V = volumen del espacio anular a engravillar,

h = longitud del tramo a engravillar,

R = radio de perforación,

r = radio de la tubería.

Una vez conocido el volumen (m³) para transmorfearlo a toneladas:

$$P = (0,85 \times V) \times \text{densidad}; \text{ (si la grava es silíceas } 2,3 \text{ t/m}^3\text{)}$$

Siempre es recomendable encargar más grava de la que se requiere según la formulación, en previsión de posibles fisuras y cavidades conectadas con la zona a engravillar.

7.4.3. Procedimientos de instalación del prefiltro de grava

La colocación de un macizo de grava en el interior de un pozo requiere especial atención:

Primero, porque al descender la grava por el anular se produce una clasificación o estratificación granular que se debe evitar. Una vez que las gravas alcanzan el nivel saturado, los granos más gruesos descienden más rápido que los pequeños, produciéndose una clasificación granulométrica en la columna del sondeo, de forma que las gravas de mayor tamaño quedan en el fondo. Si este efecto no se evita el macizo de grava no retiene los granos de arena en las zonas donde se concentran las gravas de mayor tamaño y se producen arrastres.

Segundo, porque la rejilla debe quedar perfectamente centrada, mediante el uso de centradores, para que el espesor del macizo de grava sea constante a lo largo de toda la columna engravillada.

Tercero, porque durante el descenso de la grava por el anular se genera una sobrepresión en la tubería de revestimiento del pozo debido a la diferencia de densidad del agua más la grava que desciende por el anular respecto al agua del interior del pozo. Este efecto debe considerarse en el caso de pozos con gravas entubados con PVC (ver epígrafe 7.3).

Para evitar que los granos de grava se clasifiquen por tamaños hay que agitar el agua del interior del pozo mientras la grava descende. Si el pozo se ha perforado con un método de circulación, se debe mantener el pozo lleno de agua y circularla en el interior utilizando la propia sarta de perforación. Si se ha perforado a percusión se puede hacer un pistoneo suave durante la operación de engravillado. Cuando se trata de un sondeo hecho con el sistema de rotopercusión también se puede soplar con el martillo en el tramo que se está engravillando. Incluso se pueden hacer operaciones simultáneas de desarrollo con aire comprimido.

El procedimiento más usual para colocar el prefiltro en un pozo consiste en verter la grava por el espacio anular a través de un tubo engravillador, que suele tener un diámetro comprendido entre 2 y 3" (figura 7.4.7 A). Este procedimiento se puede hacer en pozos que no tengan más de 150 m de profundidad.

En esta guía se desaconseja la colocación del prefiltro por caída libre dado que con este procedimiento se suelen generar puentes de la grava, quedando algunos tramos de la rejilla con espacios vacíos, sin prefiltro entre la tubería y la pared de la perforación.

El tubo engravillador debe estar conectado a una tolva donde se introduce la grava con agua, para facilitar su descenso. El tubo debe ir extrayéndose conforme se engravilla el pozo, asegurándose que el macizo ha quedado colocado en su sitio mediante el empleo de una plomada. No es conveniente verter la grava de forma rápida, se recomiendan ritmos de vertido de 1 a 3 toneladas por hora.

En pozos con profundidades por encima de los 150 m, la operación de engravillado es más compleja y suele ser necesario recurrir a empresas especializadas. En este tipo de casos, se suelen diseñar sondeos con una entubación en la que la zona de producción, donde se incluye la rejilla del pozo, queda colgada de la entubación general o de la cámara de bombeo. En la parte superior de la columna de producción, que queda suspendida de la entubación general mediante unos soportes instalados en el interior del entubado, se instala una pieza distribuidora de gravas (cross-over) a la que se acopla el tubo de engravillado (figura 7.4.8) que puede disponer de un obturador para facilitar la operación de engravillado (figura 7.4.9). Este método conocido como cross-over es muy versátil y dispone de muchas variantes. Requiere un varillaje bastante sofisticado y suelen ofrecerlo las mismas empresas que realizan cementaciones profundas.

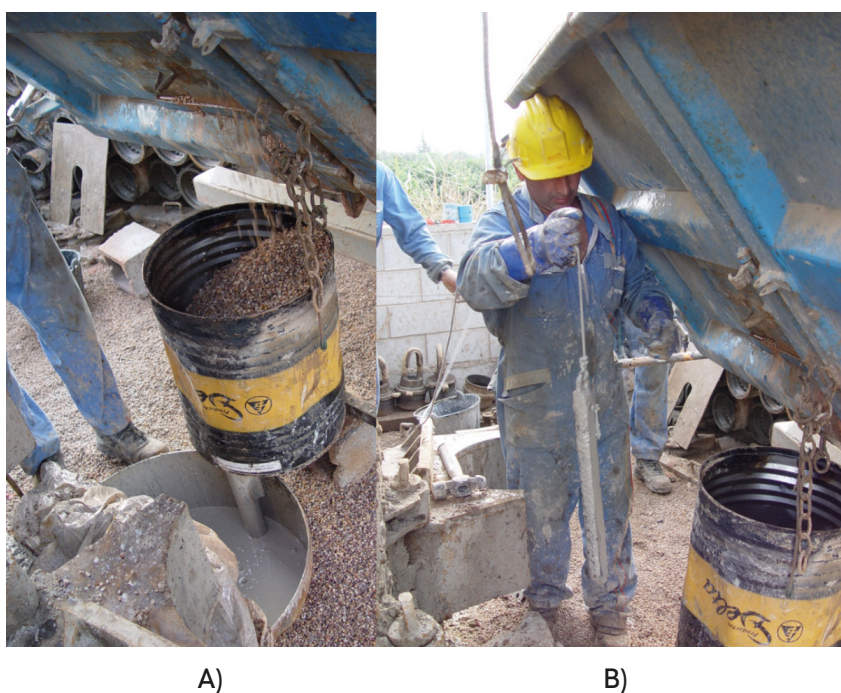


Figura 7.4.7. A) Colocación de un prefiltro de grava en un sondeo perforado a circulación mediante un tubo de engravillado. B) Comprobación de la profundidad del macizo de grava mediante plomada (Fotografías: Juan Antonio Hernández Bravo).

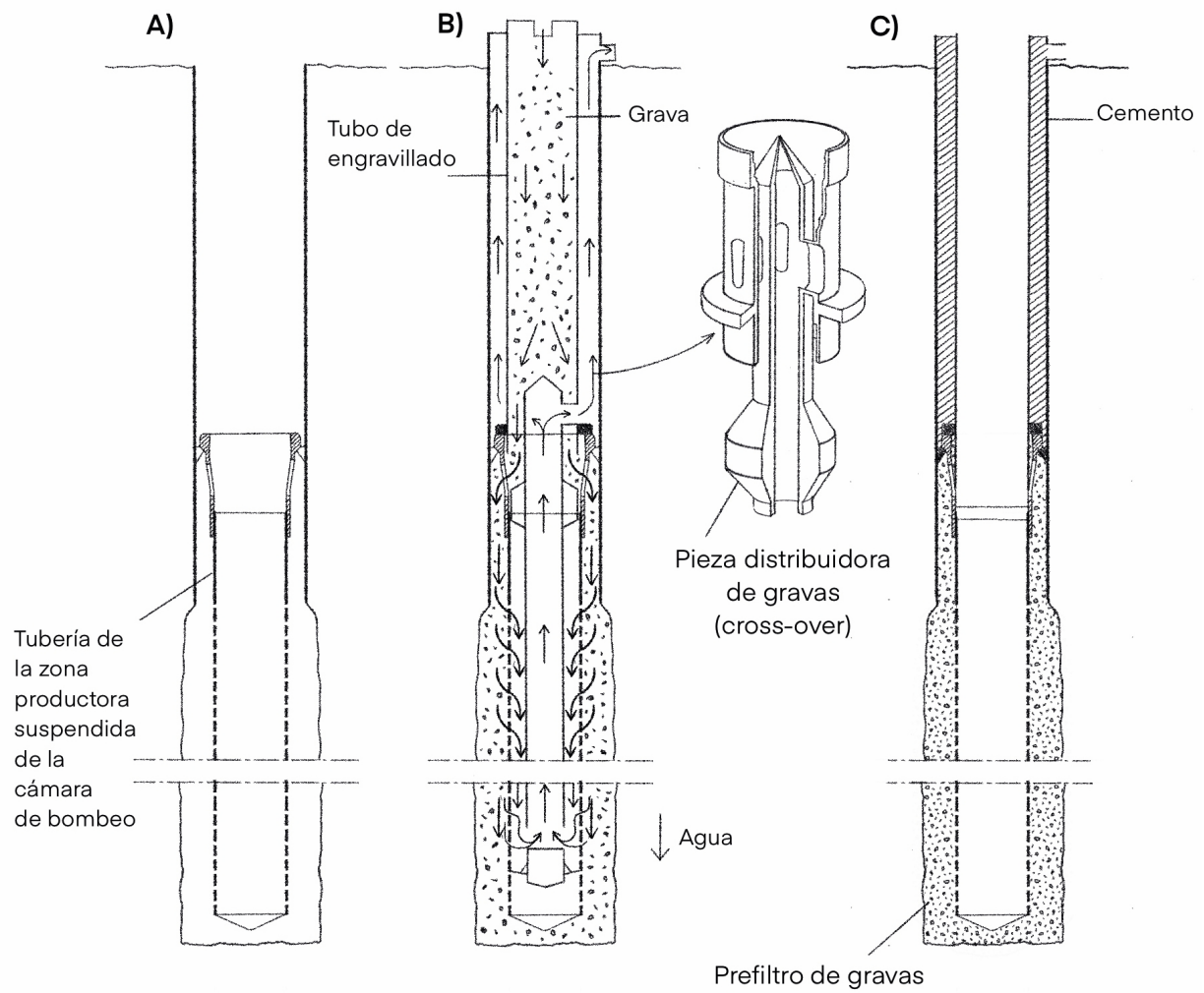


Figura 7.4.8. Colocación de un prefiltro mediante el método de cross-over sin obturadores.

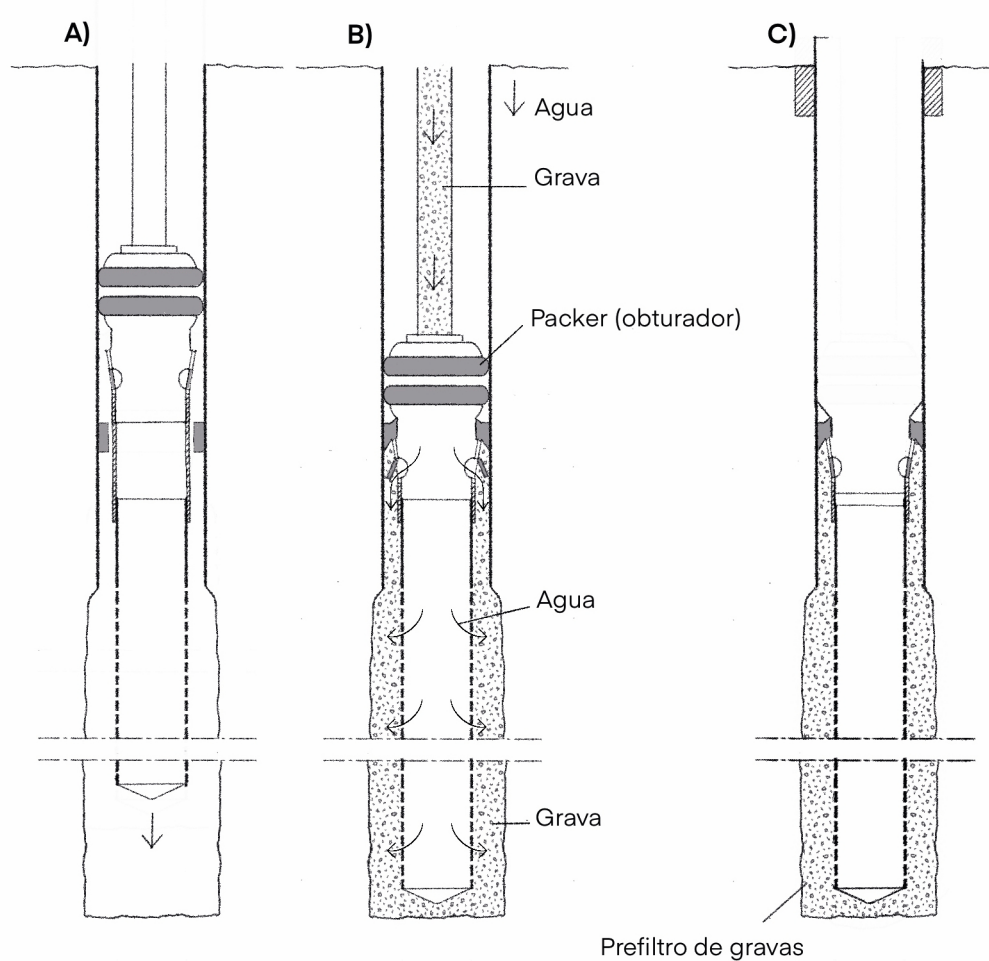


Figura 7.4.9. Colocación de un prefiltro mediante el método de cross-over con obturador.

Otra opción consiste en utilizar procedimientos en los que la grava está incorporada en la propia tubería. Es el caso de las rejillas dobles y el de las rejillas con macizo de grava pegado con resina, entre otras.

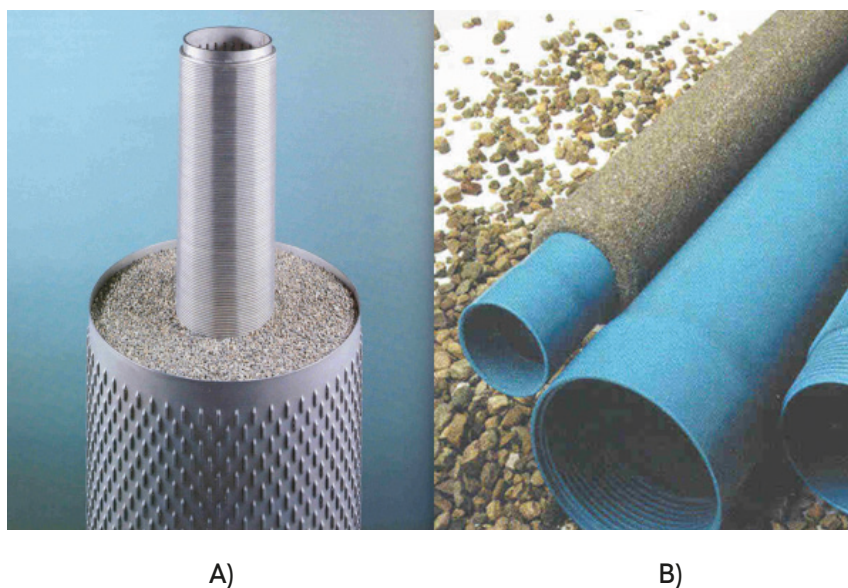


Figura 7.4.10. A) Rejilla doble, de apertura continua en el interior y de puentecillo en el exterior, con macizo de grava incorporado. B) Rejilla de PVC con macizo de arena pegado con resina a una rejilla ranurada.

7.5. Cementación y productos sellantes

7.5.1. Introducción

El proceso de colocación y fraguado de una suspensión de cemento en determinadas zonas de un sondeo se conoce como cementación. El objetivo de la cementación consiste en rellenar y unir la tubería ciega de un sondeo con la pared de la perforación o con otra tubería mediante la introducción en esos espacios de una lechada de cemento o de otros compuestos sellantes y aislar zonas fracturadas, cuevas, etc.

Las funciones de la cementación pueden ser variadas:

1. Aislar la zona superior no productora para evitar la entrada en el interior del pozo de aguas superficiales contaminadas a través del anular.
2. Evitar desprendimientos de terreno hacia la zona de admisión.
3. Disminuir la corrosión de las tuberías de revestimiento.
4. Evitar, siempre que interese, la conexión hidráulica y posterior mezcla de aguas de distintos niveles acuíferos.
5. Taponar el fondo del sondeo.
6. Liberar presiones parciales centrípetas sobre el entubado.
7. Ayudar a la sujeción de las tuberías de emboquille del sondeo.

Como materiales impermeabilizantes o sellantes se emplean el hormigón, el cemento, el mortero, arcillas comerciales en forma de lechadas o no y combinaciones de estos productos. Es posible utilizar algunos aditivos para aumentar o disminuir propiedades específicas de la lechada como la viscosidad, encogimiento o retracción, la densidad del fluido de sellado, el tiempo de fraguado y su detectabilidad mediante técnicas geofísicas.

Al cemento mezclado con agua se le denomina lechada de cemento puro. En muchas ocasiones también se añade bentonita, denominándose lechada de cemento más bentonita; siendo esta la más empleada en la construcción de pozos de explotación de agua subterránea. Por otra parte, la mezcla de bentonita y agua se denomina lechada de bentonita.

La mezcla debe ser formulada para minimizar el encogimiento y asegurar la compatibilidad con las características químicas del agua. Para introducir la lechada en la captación será necesario utilizar una bomba de inyección de cemento y una tubería auxiliar de inyección. Se recomienda que la densidad de la lechada cementante sea del orden de $1,9 \text{ g/cm}^3$ para ser inyectada con facilidad. Es necesario esperar un tiempo de secado del sellado, o de fraguado, suficiente antes de añadir material como un macizo de grava.

Los materiales utilizados para el sellado deben tener ciertas propiedades. La lechada ideal debe ser de baja permeabilidad (tabla 7.5.1), ser capaz de unirse tanto a la entubación del sondeo (si es necesario) como a la pared del mismo para proporcionar un sello hermético, ser químicamente inerte y no reactiva con los materiales de formación o componentes del agua con la que la lechada puede entrar en contacto, mezclarse fácilmente, presentar una consistencia que permita ser bombeada en un período de tiempo adecuado, poder ser introducida en el pozo a través de un tubo del orden de 2" de diámetro, en todo caso mayor o igual a 1" de diámetro, tener una penetración mínima en zonas permeables, ser fácil de limpiar, estar disponible a un costo razonable y que sea segura de manejar.

Material aislante	Permeabilidad (cm/s)
Cemento puro	10^{-7}
Lechada de bentonita (20 % bentonita)	10^{-8}
Pellets de bentonita	10^{-8}
Bentonita granular	10^{-7}
Lechada de polímero/bentonita granular (15 % bentonita)	10^{-8}
Bentonita gruesa	10^{-8}

Tabla 7.5.1. Permeabilidad de varios materiales sellantes (State Coordinating Committee on Ground Water, 1996).

7.5.2. Lechadas de cemento y de bentonita

El cemento es un aglomerante hidráulico obtenido por cocción y posterior molienda, de una mezcla de caliza y arcilla, en proporciones aproximadas de 3 a 1. Cuando se mezcla con agua se suceden diversas reacciones químicas que llevan al fraguado. Durante este proceso se libera calor, que puede afectar a las tuberías de PVC e inducir una pérdida de adhesión entre la tubería y el sello de cemento. El comportamiento del cemento depende de la calidad del agua de preparación y de la perforación.

Las características y requerimientos que debe presentar el cemento en relación con las mezclas sellantes se recogen a nivel internacional en la norma ASTM C150 "Standard Specifications for Portland Cement", o la norma API 10B. En España deben tenerse en cuenta las normas equivalentes en AENOR (normas para la recepción de cementos RC-16 y UNE).

El cemento Portland es el ingrediente principal en lechadas a base de cemento. La **lechada de cemento puro** está compuesta de cemento Portland y agua dulce, sin presencia de agregados. El **mortero de cemento** consiste en la mezcla de agua, cemento y arena (en una proporción, según ACA (2009), de 27 l de agua para una bolsa de 50 kg de Cemento Portland y otra bolsa de igual volumen que la de cemento, pero de arena). Hay varios tipos de cemento Portland con diversos tiempos de endurecimiento: el Tipo I es de uso general, el Tipo II se emplea cuando el agua subterránea tiene entre 150 y 1500 ppm de sulfatos, el Tipo III es de fraguado rápido, el Tipo IV se emplea cuando la velocidad y cantidad del calor generado por el cemento debe mantenerse al mínimo y el Tipo V se usa cuando los niveles de sulfato en el agua subterránea exceden 1.500 ppm. El endurecimiento o curado de la pasta empleando el cemento Tipo I solo o en mortero de cemento es de 24-48 horas y 12 horas para el cemento Tipo III o mortero de cemento (State Coordinating Committee on Ground Water, 1996; ACA, 2009).

Como aditivos para cemento se pueden añadir aceleradores para disminuir su tiempo de fraguado. El cloruro de calcio es el acelerador más común y fácilmente disponible. Se utiliza generalmente entre 2 y 4 % en peso de cemento. Estos aceleradores se deben usar con precaución, ya que los errores de cálculo pueden estropear los equipos de inyección, además de existir incompatibilidades. Por ejemplo, si se emplea cemento con bentonita, el uso del cloruro de calcio como aditivo produce una sustitución del sodio de la bentonita sódica por el ión calcio del aditivo.

En cuanto a los aditivos para las mezclas con el cemento Portland, se recomiendan las especificaciones de la norma ASTM C494 "Standard Specifications for Chemical Admixtures for Concrete" o la API RP 10B "Recommended practice for testing well cements", o la equivalente en España (RC-16). Factores tales como el tipo de cemento, los aditivos y la calidad de las aguas subterráneas afectarán al rendimiento de la lechada y deben tenerse en cuenta en la planificación de la operación de inyección.

La lechada de cemento puro se usa para sellar aberturas pequeñas, penetrar el espacio anular vacío por fuera de la tubería y llenar espacios en la roca circundante. Es particularmente recomendable para el sellado de captaciones en las que el zócalo de roca consolidada se encuentra hasta una profundidad máxima de 8 m, ya que forma un sello muy duro. Para sellar pozos surgentes o que afectan a más de un acuífero es adecuado inyectar la lechada a presión. Esta inyección se puede realizar con tubería auxiliar interna y cierre de cabeza o utilizando dispositivos de cementación con doble obturador, si se pretende inyectar determinados tramos, y otros rellenarlos con arena, por ejemplo. Tiene algunas desventajas como el encogimiento después del endurecimiento, y la posible formación de microfisuras en el contacto con la tubería y la formación de microespacios anulares alrededor de la entubación. Cuando se prepara con proporciones mayores de agua, disminuye la resistencia a la compresión y aumenta la retracción. Por ello, aunque la mayor fluidez de la lechada facilite la inyección, no es recomendable utilizar más de 10 l de agua cada 25 kg de cemento (ACA, 2009).

En el mortero de cemento se emplea arena porque produce menor retracción y mayor adherencia a la entubación y pared del sondeo. Además, la arena en la suspensión ayudará en la reducción de poros en formaciones permeables. No obstante, no penetra bien en las fisuras, grietas e intersticios. Este mortero de cemento se debe utilizar solamente bajo circunstancias específicas. Por ejemplo, para el sellado de sondeos surgentes, el sellado de captaciones de agua con gas natural o metano presente, y el sellado de pozos con zonas cavernosas. También es utilizado como relleno de la parte superior de la captación, en la zona no saturada, para conectar secciones cortas de la entubación o para el relleno de pozos de gran diámetro. El mortero de cemento únicamente puede ser vertido al pozo cuando no hay columna de agua, si no debe inyectarse desde el fondo hacia arriba, mediante tubería auxiliar bajo el nivel del agua. Las bombas de lodo están especialmente diseñadas para soportar el paso de la arena, aunque los agregados de partículas gruesas pueden dañarlas.

Las **lechadas de cemento más bentonita** son las más utilizadas en pozos de explotación de agua subterránea, dado que son más estables que las de cemento puro, más fáciles de manejar y, especialmente, porque su retracción una vez se produzca el fraguado es mucho menor. Consisten en una mezcla de cemento con arcilla de tipo bentonita. Es aconsejable utilizar proporciones del 2 al 6 % de bentonita respecto al peso de cemento, es decir de 1 a 3 kg de bentonita por cada 50 kg de cemento. En la tabla 7.5.2 se presentan datos orientativos sobre la proporción bentonita/cemento, la cantidad de agua a añadir, densidad y volumen de suspensión resultante en distintos supuestos.

Bentonita/Cemento (%)	Densidad	Agua por saco de cemento (litros)	Volumen de lechada resultante por saco* de cemento (litros)
0	1,75	14,25	22,4
	1,80	13,25	21,2
	1,85	12,25	20,1
	1,86	11,875	19,8
	1,88	11,5	19,4
	1,90	11	18,9
	1,95	10	17,9
	2,02	8,75	16,7
	1,76	14,5	22,7
2	1,80	13,5	21,7
	1,85	12,25	20,4
	1,90	11,25	19,3
	1,69	16,875	25,4
4	1,75	15,375	23,6
	1,80	13,75	22,1
	1,82	13,25	21,6

Bentonita/Cemento (%)	Densidad	Agua por saco de cemento (litros)	Volumen de lechada resultante por saco* de cemento (litros)
6	1,64	18,75	27,6
	1,70	16,875	25,5
	1,75	15,25	23,9
	1,77	14,75	23,3

Tabla 7.5.2. Datos orientativos sobre la proporción bentonita/cemento, cantidad de agua a añadir a la lechada de cemento más bentonita y densidad y volumen de suspensión resultantes para distintas proporciones de mezcla de cemento y bentonita (a partir de Bayó (1996), Morell (2004) y ACA (2009)). (*) Saco de 25 kg de cemento.

Es muy importante conocer la densidad de una lechada y la longitud de sondeo a cementar antes de proceder a su colocación. Durante la fase de cementación, la diferencia de densidad entre la columna de lechada y la columna de agua o lodo existente en el interior del sondeo genera una sobrepresión radial en la tubería que puede llegar a aplastarla (ver los ejemplos de las figuras 7.3.3 y 7.3.4 de esta guía). Si no se hacen los cálculos de presión correspondientes puede correrse el riesgo de perder el sondeo. Si se va a generar mucha presión, se deberá hacer una cementación por fases, es decir, cementar un tramo, dejar que fragüe y volver a cementar otro tramo encima del que ya está fraguado, y así sucesivamente. Esta actuación conlleva unos tiempos de parada del equipo de perforación que deben ser considerados en el proyecto y en el presupuesto del sondeo.

Debe ser indicado que existen numerosas casas comerciales que ofrecen mezclas preparadas de cemento, bentonita y otro tipo de arcillas con distintos aditivos, con objeto de controlar el retardo o la aceleración del fraguado, reducir el aumento de temperatura durante el fraguado y para localizar la colocación de la lechada mediante registros geofísicos en el pozo, entre otros aspectos.

7.5.3. Otros productos sellantes

Además de las lechadas de cemento, hormigón y bentonita existen otros productos sellantes, entre los que destacan los **pellets de bentonita**.

La bentonita es una arcilla montmorillonítica que se caracteriza por la alta capacidad de absorción del agua, aumentando su volumen hasta 10-12 veces y permaneciendo en suspensión cuando está mezclada con ella. La variedad de bentonita más utilizada es la montmorillonita predominantemente rica en sodio. Las bentonitas que contienen calcio son menos deseables como sellado, ya que tienen menor capacidad de hinchamiento, en torno a dos veces su volumen seco (Gaber y Fisher, 1988). No debe ser utilizada cuando la concentración de cloruro en el agua excede de 1500 ppm o hay hidrocarburos presentes.

La bentonita, además de comercializarse en sacos para la preparación de lechadas, también se puede encontrar en forma de virutas o chips, para verterla directamente en el sondeo como se hace en el caso de los prefiltros de grava. Con todo, son la bentonita granulada o los pellets de bentonita los más comercializados como sellante, dentro de estos impermeabilizantes granulados.

La bentonita muy gruesa o en virutas (chips) supone un gran tamaño de partícula y de densidad. El tamaño de estas virutas se encuentra entre 1/4 y 3/4 de pulgada (6 a 19 mm) y están destinadas a caer sin formar puentes a través de una columna de agua dentro de la perforación. Debido a su tamaño, se debe tener cuidado en su uso. Este material no puede ser bombeado, debe ser vertido lentamente y emplear un cedazo o mallado de 6 mm (1/4 de pulgada) para permitir que los finos caigan y detener la operación cada 20 kg de arcilla (un saco) para medir mediante una plomada en el anular y verificar que no se hayan generado puentes o bien no superar la velocidad de 3 min/saco de 25 kg. Si el agua es insuficiente en el pozo, hay que añadir agua a intervalos apropiados durante el proceso de vertido. No debe haber más de un metro de chips de bentonita seca en el pozo durante el proceso de llenado.

No es recomendable usar chips de bentonita a más de 60 m de profundidad y en anulares de sondeos que tengan una separación entre el tubo y la pared del sondeo menor de 100 mm.

La bentonita granulada (o pellets de bentonita) se comercializa en distintos tamaños siendo los más frecuentes los que corresponden a 1/4 y a 1/2 de pulgada. La alta expansividad de las arcillas comercializadas produce una presión en el espacio anular, entre el tubo y la pared del sondeo, que impide la entrada de fluido lateralmente al ser un material de baja permeabilidad. En agua salada, su expansividad es limitada, por lo que se deben conocer los valores de salinidad recomendados por los fabricantes. Las casas comerciales de estos productos han desarrollado pellets que al estar prensados al vacío retardan su hinchamiento durante su descenso, evitando la formación de puentes. Asimismo, hay disponibles pellets de bentonita de distintas densidades para acelerar la velocidad de sedimentación, con propiedades magnéticas o con radiaciones elevadas para ser detectadas con equipos de testificación geofísica de sondeos. Para su vertido por el anular del pozo se deben tomar precauciones similares a las empleadas para el uso de las virutas de bentonita.

7.5.4. Procedimientos de cementación

Los métodos para proceder a la cementación de un sondeo dependen de la profundidad a la que se debe colocar la lechada. En la bibliografía disponible se dan diferentes rangos de profundidad, sin embargo, en la mayoría de los casos se admiten procedimientos con vertido de la lechada desde la superficie hasta profundidades de 50 m, mientras que entre 50 y 500 m de profundidad se recomiendan métodos de inyección de la lechada con tubos auxiliares de cementación y procedimientos especiales cuando las profundidades son mayores de 500 m.

En la figura 7.5.1 se sintetizan los principales métodos de cementación. En el esquema A se representa el método de desplazamiento con tubería taponada en el fondo. Es un método que se utiliza para aislar la parte superior de un pozo. La lechada se vierte desde superficie y luego se desciende la tubería de revestimiento con un tapón perforable en el fondo, añadiéndole agua al interior de la tubería para compensar el efecto de flotación. También se puede hacer sin tapón de fondo. Se vierte la lechada, se coloca la tubería con sus correspondientes centradores y después del fraguado se perfora el cemento que ha quedado en el anular interno. En algunas guías se recomienda utilizar estos métodos para profundidades de hasta 50 m, pero en otras no se recomienda aplicar estos procedimientos para más de 20 o 30 m de profundidad. Cuando en los primeros metros perforados existen bolos de gran tamaño o cuando están muy alterados, se debe colocar una tubería provisional que se retira después de verter la lechada, siendo recomendable utilizar mortero de cemento con un aditivo gelificante.

En la figura 7.5.1 B se representa la inyección de la lechada por el anular mediante una tubería auxiliar de cementación (estas suelen tener diámetros comprendidos entre 1/2 y 3/4 de pulgada). Es recomendable colocar un tapón de fondo perforable en la tubería de revestimiento y rellenar la tubería con agua o lodo para compensar la presión radial centrípeta que ejerce la lechada (figuras 7.3.3 y 7.3.4). Cuando se tienen que cementar grandes longitudes de entubación y para evitar una presión radial centrípeta que pueda aplastar la tubería, se puede utilizar este método haciendo cementaciones por fases. Se recuerda que 100 m de columna de lechada de densidad 1,9 t/m³ ejercen una presión de hasta 19 kg/cm². Si se rellena el anular interior de la tubería con agua, la presión diferencial será de 9 kg/cm², en esos 100 m. Si nuestra tubería no puede resistir la presión que va a ejercer la lechada, la solución consiste en cementar un tramo que ejerza una presión inferior a la resistencia de la tubería, esperar a que fragüe la lechada, y cementar otro tramo y así sucesivamente, hasta conseguir cementar toda la columna. En la cementación por fases deben ser considerados los tiempos de parada de los equipos de perforación, dado que, en el mejor de los casos, un fraguado de una lechada de cemento y bentonita con aceleradores requiere un mínimo de 12 horas de parada. Operando con este procedimiento se pueden cementar columnas de hasta 500 m de longitud.

En el ejemplo de la figura 7.5.1 C se esquematiza la cementación a presión mediante una tubería de inyección colocada en el interior de la tubería de revestimiento, tubería que se obtura en la cabeza del sondeo y que debe quedar suspendida durante la fase de cementación. Entre el fondo de la tubería y el fondo de la perforación se debe dejar una distancia mínima de 40 a 50 cm. Este método también se usa hasta profundidades de 500 m y es muy parecido al de la figura 7.5.1 D. En el caso de la figura 7.5.1 D, se coloca en el fondo de la tubería de revestimiento un tapón perforable, con una válvula que suele ser plástica, que va acoplada a la tubería de inyección de la lechada. El último ejemplo, el 7.5.1 E, es el método conocido como método *casing* o, en castellano, método del tapón de cemento. La tubería de revestimiento requiere un cierre de cabeza, diseñado para permitir añadir sucesivamente el tapón o los tapones perforables y la inyección de la lechada y de los fluidos de desplazamiento. Se puede realizar con válvula de fondo o sin ella. En el caso representado se utiliza un solo tapón y la lechada se inyecta mediante una bomba de cementación por el interior de la tubería de revestimiento. Una vez se ha inyectado el volumen de lechada necesario, se coloca un tapón perforable y se pasa a inyectar, por encima del tapón, agua o lodo de perforación, para desplazar el cemento del interior de la tubería de revestimiento al anular comprendido entre la pared del taladro perforado y el exterior de la tubería. Este método se puede usar también con dos tapones y para profundidades mayores de 500 m.

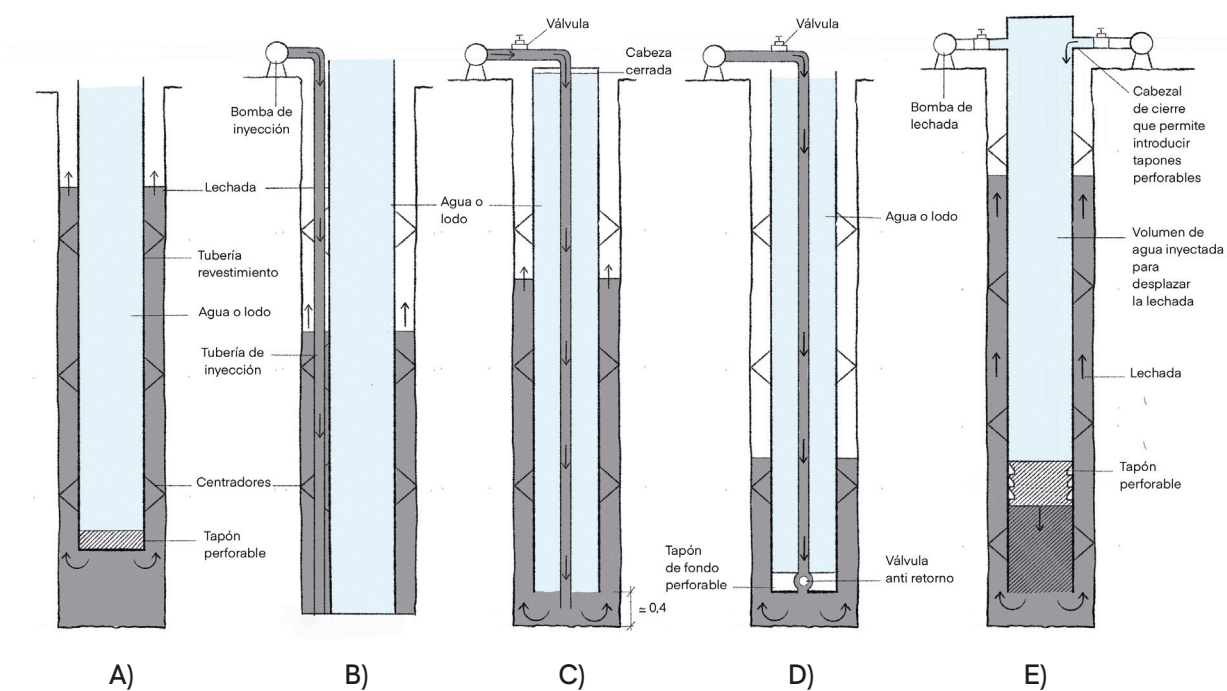


Figura 7.5.1. Métodos convencionales de cementación de pozos de captación de agua subterránea. A) Método del desplazamiento. B) Inyección de lechada mediante tubería auxiliar de cementación introducida por el anular del sondeo. C) Inyección de lechada con tubería auxiliar y de cementación por el interior de la tubería de revestimiento, con cierre de la cabeza de la tubería de revestimiento, que debe estar suspendida. D) Inyección de lechada con tubería auxiliar de cementación por el interior de la tubería de revestimiento, que debe estar suspendida, además de disponer de un tapón y una válvula antirretorno perforables. E) Método casing o método del tapón de cemento.

Cuando se quiere cementar el anular de un pozo en el que la rejilla filtrante va conectada a la entubación general del pozo, se recomienda cementar 3 o 4 m por encima del prefiltro, dejar que fragüe esa lechada, y entonces proseguir con la cementación por el anular del sondeo (figura 7.5.2). Si es posible, también se pueden añadir 3 o 4 m de pellets de bentonita en el anular y cementar por encima.

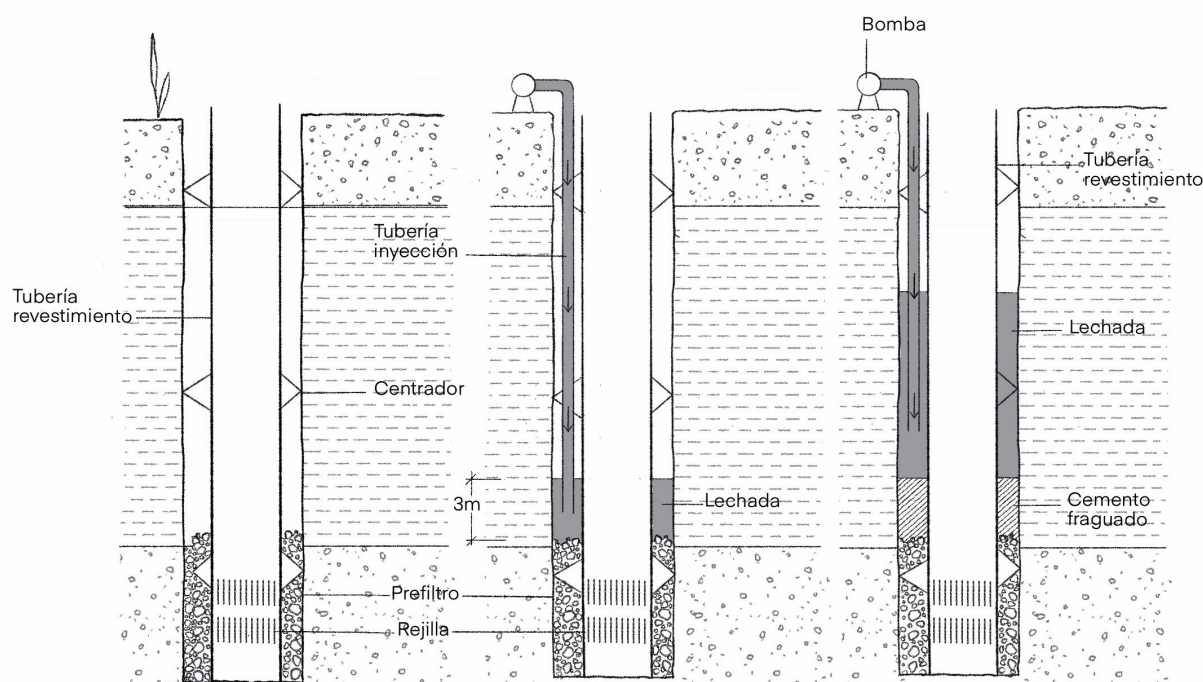


Figura 7.5.2. Cementación de un pozo de captación de agua en el que la zona de rejilla está conectada con la entubación general del pozo. Posteriormente se procede a la colocación y fraguado de 3 m de lechada por encima del prefiltro de grava mediante una tubería auxiliar de cementación. Después de engravillar se hace la cementación del resto del anular del sondeo.

Para realizar cementaciones especiales también se pueden utilizar distintos dispositivos que requieren del uso de *packers* u obturadores y válvulas de cementación. Los *packers* son obturadores neumáticos o mecánicos, generalmente fabricados con un material expandible, como aluminio, madera, goma o neopreno, que permiten cementar un pozo a una profundidad preseleccionada. El empleo de *packers* y válvulas de cementación posibilita la inyección de precisión de la lechada. Basta con colocar los *packers* frente a un tramo concreto de una tubería de revestimiento en la que previamente se han acoplado unas válvulas que permiten el paso de la lechada e impiden su retorno hacia el interior del pozo (figura 7.5.3). Son especialmente útiles en aquellos casos en que hay que efectuar una cementación por fases o cementar tramos discontinuos, por existir niveles muy permeables, fracturas abiertas, conductos o cavidades kársticas que hacen inviable en la práctica su cementación.

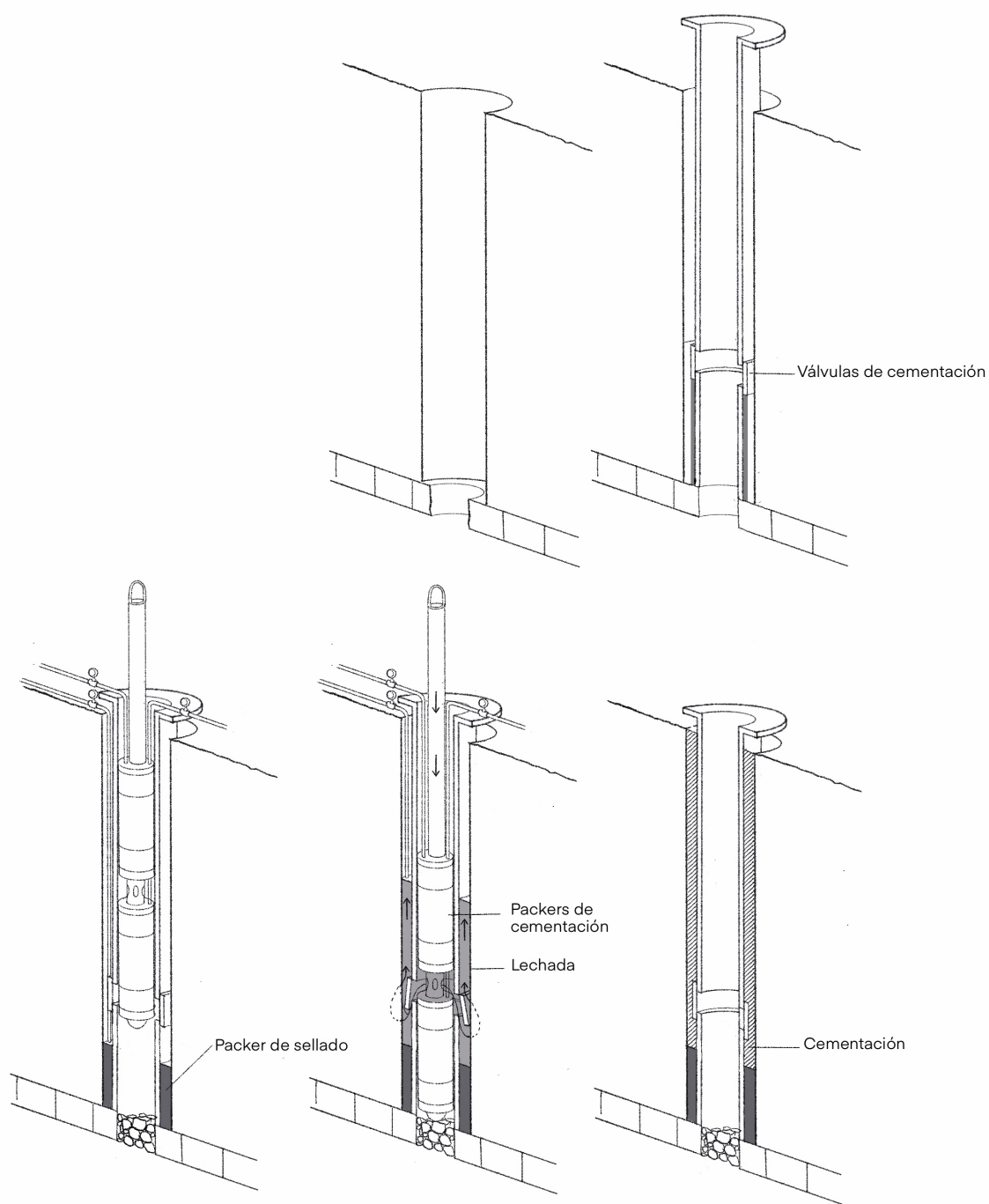


Figura 7.5.3. Procedimiento de sellado mediante doble obturador. A) perforación sin entubar. B) descenso de tubería de revestimiento con obturador (packer) y válvula de cementación. C) descenso del equipo de cementación con doble obturador (packer). D) inyección de la lechada de cemento/bentonita. E) terminación final del sondeo cementado en materiales kársticos.

7.5.5. Esquemas y profundidades de cementación

En la figura 7.5.4 se proponen varios esquemas de cementación atendiendo a si los acuíferos son libres o confinados. En ambos tipos de acuíferos se presentan dos modalidades de cementación:

Una cementación de mínimos, con la que se evita, primero, la entrada de contaminantes en el tramo o tramos acuíferos captados por el pozo, y segundo, la intercomunicación de acuíferos.

Una cementación óptima, con la que, además, al cementar buena parte de la tubería, se consigue proteger la entubación contra la corrosión y se minimizan las fuerzas radiales centrípetas.

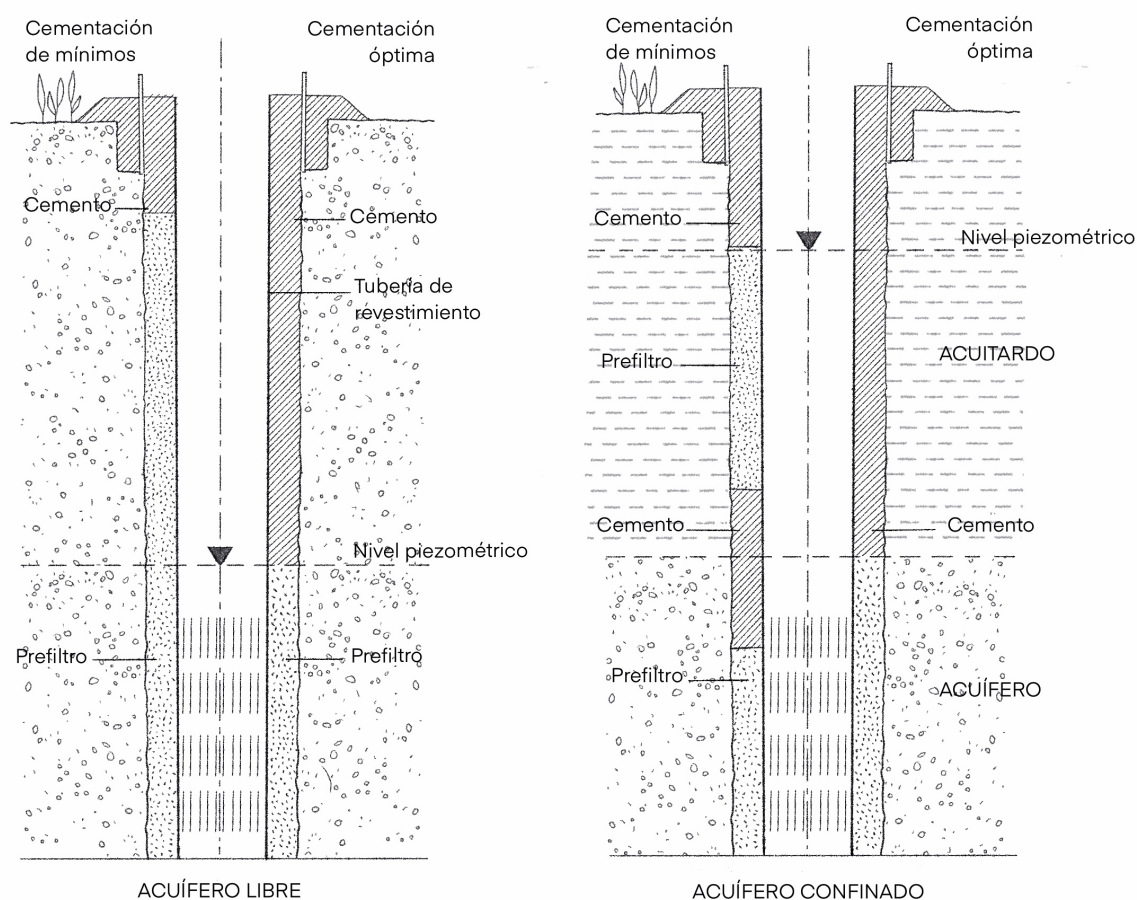


Figura 7.5.4. Esquema de cementación para acuíferos libres y confinados.

La cementación óptima de un acuífero libre sellaría los anulares externos de la tubería o tuberías de revestimiento desde la superficie del terreno hasta la profundidad del nivel dinámico. En el caso de los acuíferos confinados el sellado debería penetrar 1 m en el techo del acuífero.

En los acuíferos libres detríticos en los que el nivel piezométrico es profundo existe la posibilidad de cementar tan solo los metros más superficiales del sondeo, si bien la longitud de la columna cementada debe depender del riesgo de contaminación. Como criterios para valorar la capacidad de autodepuración de la zona no saturada y por tanto, para establecer la profundidad de cementación, se pueden utilizar el método de Rehse, para materiales detríticos, y la modificación de Bolsenkötter, para medios kársticos o fisurados (Martínez-Navarrete y García-García, 2003). En todo caso, se reco-

mienda cementar al menos los primeros 3 m del sondeo, en acuíferos detríticos, y 18 m en acuíferos kársticos. En el caso de materiales kársticos será preferible optar por la cementación por tramos separados, aprovechando zonas más compactas y utilizando el sistema de obturadores y válvulas de cementación. Finalmente, en el caso de sondeos profundos será preferible la utilización combinada de diversos métodos de cementación.

7.6. Ensayos de bombeo

7.6.1. Introducción

Una vez finalizada la perforación y el acondicionamiento de un sondeo de captación de aguas subterráneas es imprescindible proceder a la realización de un ensayo de bombeo. Este tipo de ensayos permite conocer las características hidrodinámicas del acuífero captado, el caudal de explotación más aconsejable, la posición y la potencia de la bomba necesaria para explotar ese caudal.

En este capítulo se describe qué es un ensayo de bombeo, qué se requiere para su realización, cómo se programa, cómo se ejecuta y qué información debe incluirse en el informe final. No es el objetivo de esta guía describir la hidráulica de captaciones de aguas subterráneas ni los numerosos métodos de interpretación existentes, dado que para estas cuestiones se recomienda la lectura de obras mucho más detalladas como las de Kruseman y De Ridder (1975), Custodio y Llamas (1983) o la de Villanueva e Iglesias (1984), todas en castellano.

7.6.2. Definición y objetivos de los ensayos de bombeo

El ensayo de bombeo es un método de evaluación de las características hidrodinámicas del acuífero captado, con la consecuente estimación del caudal de explotación más aconsejable, y del rendimiento hidráulico de la captación ensayada.

Los ensayos de bombeo deben realizarse porque la información que aportan, tanto de datos sobre el acuífero como sobre la eficiencia del sondeo, es el punto de partida para:

1. Conocer la explotación adecuada del pozo.
2. Diseñar correctamente las instalaciones de impulsión.
3. Estimar las garantías de funcionamiento a largo plazo (combinándolo con el estudio hidrogeológico).

La metodología de ejecución de los ensayos de bombeo es sencilla. Consiste en extraer agua de una captación mediante un bombeo, a caudal constante o a caudal variable, y controlar la evolución del nivel piezométrico tanto en la captación desde la que se hace el bombeo como en otros sondeos de observación cercanos, si los hubiere. Las distintas modalidades de ensayo se resumen en la tabla 7.6.1.

El ensayo de bombeo es una prueba del medio físico que tiene una gran representatividad espacial. El agua que se bombea desde el sondeo viene de zonas del acuífero separadas de este, y mayor es la lejanía de extracción del agua cuanto mayor es el caudal y el tiempo de bombeo.

Tipos de ensayos de bombeo	A caudal constante	Régimen permanente	Prueba en bombeo
		Régimen variable o transitorio	Prueba en bombeo
	A caudal variable	Prueba en recuperación	
		Bombeo a caudal crítico	
		Bombeo escalonado	

Tabla 7.6.1. Principales tipos de ensayos de bombeo de aguas subterráneas.

7.6.3. Programación y ejecución de ensayos de bombeo

7.6.3.1. Conocimiento geológico e hidrogeológico

El conocimiento adecuado de la geología y la hidrogeología del entorno de la captación de agua subterránea a estudiar es fundamental para la correcta realización de un ensayo de bombeo.

La cartografía geológica del entorno de la captación puede poner de manifiesto la presencia de límites laterales de diferente permeabilidad, presencia de fallas o superficies de cabalgamiento, etc. Además, esta cartografía también sirve para poder tener una idea del área de recarga del acuífero captado.

La columna litológica del sondeo puede ayudar a, de antemano, predecir la respuesta hidrodinámica del acuífero al bombeo (drenaje diferido, drenaje vertical o goteos, o si el acuífero es libre o confinado). Incluso puede dar ideas de la susceptibilidad de cada formación a almacenar y transmitir el agua. No obstante, y debido a la gran variabilidad de la permeabilidad, estas estimaciones deben ser consideradas con mucha cautela.

Además de la columna litológica, también se deben conocer, con el mayor grado de detalle que sea posible, las características constructivas del sondeo (diámetros y profundidad de la perforación, diámetros y espesores de la entubación y la rejilla, longitud y tipo de esta rejilla, tramos cementados, tramos con prefiltro de grava, ...), datos de caudales y descensos obtenidos en distintas operaciones durante la construcción y limpieza del pozo. También se deben conocer las principales características hidrogeológicas de la zona, tipo de acuífero, presencia de barreras hidrogeológicas, ríos, lagos, etc.

Asimismo, se requiere saber si existen sondeos que se puedan utilizar como piezómetros y pozos cercanos en funcionamiento que puedan afectar al cono de bombeo del ensayo a realizar.

Siempre es de gran interés disponer de datos piezométricos previos al ensayo para conocer la tendencia temporal en la evolución del nivel piezométrico en el entorno del sondeo a ensayar. Por eso, antes de la realización de ensayos de bombeo de larga duración, es conveniente controlar la evolución del nivel durante 4 o 5 días.

7.6.3.2. Estudios previos y trabajos auxiliares

Limpieza previa al ensayo

Es probable que el agua que se extrae durante la fase final de la limpieza del sondeo tras su acondicionamiento presente arrastres de limos o arcillas e incluso de arenas. Si el sondeo no ha sido convenientemente desarrollado se pueden tener problemas durante el posterior ensayo de bombeo.

Por eso, cuando el sondeo no queda limpio completamente, es recomendable aumentar el tiempo de desarrollo. Si el agua sigue presentando arrastres es conveniente hacer un bombeo previo que aclare el agua paulatinamente. Estos bombeos con fines de desarrollo se deben realizar con caudales escalonados crecientes y paradas intermitentes que inviertan el flujo de agua en las inmediaciones del sondeo.

Accesos al lugar

Para realizar un ensayo de bombeo en un sondeo que aún no está instalado se debe desplazar un equipo de bombeo, que suele estar formado por un camión en el que se transporta todo el equipo de impulsión, y un grupo electrógeno que alimentará la bomba. Antes de que se desplace el equipo se debe conocer si este puede acceder al emplazamiento y si existe el espacio suficiente para que el equipo pueda trabajar en condiciones adecuadas.

Cuando existan piezómetros de observación en el ensayo, los accesos entre los distintos puntos han de ser fáciles, de modo que el control del conjunto se pueda hacer del modo más cómodo posible.

Evacuación del agua bombeada

Durante la ejecución de los ensayos de bombeo es necesario evitar los retornos de agua hacia el acuífero o acuíferos ensayados, en especial en acuíferos libres, con el nivel piezométrico a poca profundidad, y en acuíferos kársticos, donde la presencia de vías preferenciales de flujo puede favorecer la rápida infiltración del agua bombeada. Los efectos del retorno de agua hacia el pozo pueden hacer que la prueba no sea válida.

Los ensayos de acuíferos confinados, con materiales impermeables de gran potencia superpuestos al acuífero, o en semiconfinados con un potente acuitardo suprayacente a la formación permeable, no requieren obras auxiliares para evitar los retornos, pero siempre hay que evitar que el agua pueda percolar por el anular del sondeo hasta el acuífero. Para evacuar el agua del bombeo se pueden utilizar tuberías, acequias y canales próximos, mangueras, zanjas impermeabilizadas, etc.

También se deben identificar las zonas de posible encharcamiento que pudieran afectar a vías de comunicación cercanas, dar lugar a afecciones medioambientales o causar perjuicios a propietarios de fincas próximas, con el fin de poder adoptar las medidas preventivas adecuadas (limpieza de cunetas, selección de la ubicación de los puntos de descarga en función de las pendientes del terreno, etc.).

7.6.3.3. Características de los piezómetros de observación

La interpretación de un ensayo de bombeo es mucho más completa cuando, además de en el pozo de bombeo, se hacen medidas en uno o en varios puntos de observación cercanos.

Si se pretende utilizar sondeos preexistentes como piezómetros en el entorno del pozo que se ensaya, se debe tener en cuenta que los piezómetros deben tener unas características constructivas y una columna litológica parecidas a la del sondeo donde se bombea.

Si se dispone de valores preliminares de transmisividad y de coeficiente de almacenamiento se pueden hacer tanteos con las fórmulas de Jacob o de Theis (con la corrección de Jacob-Cooper, si el acuífero es libre) para determinar qué descenso se provocará a una distancia determinada con diferentes tiempos de bombeo. Es recomendable provocar descensos de más de 10 cm en el piezómetro más alejado del punto de bombeo.

Los piezómetros deben estar a una distancia del pozo adecuada para que se produzcan descensos durante el tiempo de ensayo. En los piezómetros, se empiezan a notar descensos pasado un tiempo desde iniciado el ensayo, y cuanto más alejado está más tiempo tardan en llegar las afecciones. Tanto es así que a veces no se producen si el tiempo de bombeo no es suficientemente largo.

En la utilidad del piezómetro para el ensayo, según su distancia al pozo, influye principalmente el tipo de porosidad del acuífero y si este acuífero es libre, confinado o semiconfinado.

En los acuíferos detríticos, y sobre todo si son libres, los piezómetros pueden estar entre 5 y 25 m e incluso llegar a 50 m, aunque en este caso tardaría más en notarse la afección y no sería tan acusada. Distancias mayores requerirían bombeos muy largos para lograr una buena interpretación en el piezómetro. Si el acuífero es detrítico y está confinado, las distancias anteriores pueden aumentar.

En los acuíferos kársticos, los piezómetros muy próximos pueden dar resultados que no son representativos. Un piezómetro muy próximo al sondeo puede estar conectado con él o absolutamente incomunicado, y en consecuencia puede tener descensos idénticos a los medidos en el sondeo donde se está bombeando o no acusar descensos. Sin embargo, los piezómetros situados de 20 a 200 m, en acuíferos kársticos libres, suelen dar garantías cuando están conectados a través de la red de fracturas. Si el acuífero es confinado, los piezómetros se pueden situar a distancias mayores, de hasta unos 400 m. Pero siempre será preciso, con piezómetros alejados, bombear el tiempo suficiente y, por supuesto, con caudales elevados.

7.6.4. Selección de los medios humanos y del material adecuado para la ejecución de un ensayo de bombeo.

7.6.4.1. Equipo técnico

Para la realización de la prueba será preciso contar con la colaboración de una empresa especialista en este tipo de ensayos. Normalmente, la empresa pone a disposición los operarios que realizan el montaje y el desmontaje del equipo de bombeo y el control de los caudales y de los niveles piezométricos de acuerdo con las instrucciones del hidrogeólogo.

El especialista en hidrogeología debe ser el responsable de tomar las decisiones oportunas, según las incidencias que vayan produciéndose durante el desarrollo del ensayo. A veces, según sea el número de piezómetros a controlar durante la prueba de bombeo, es necesario contar con personal auxiliar que lleve a cabo la medición de los datos de nivel de los distintos puntos de observación de que se dispone, o bien, instalar sensores de medida en continuo. La presencia de un hidrogeólogo con experiencia es imprescindible en las tres fases que requiere todo ensayo de bombeo: planificación previa, desarrollo de la prueba en campo e interpretación y redacción del informe final, donde se recogerán los resultados, conclusiones y recomendaciones. Se remarca la importancia de la correcta ejecución de los ensayos de bombeo ya que ocasionalmente se ha visto, en tramitaciones de expedientes de concesión, que los solicitantes aportan como ensayos de bombeo meros desarrollos de las captaciones, de poca duración, con distintos caudales y sin tomar los datos piezométricos con la precisión y el tiempo necesarios para que puedan interpretarse, realizados por empresas no cualificadas y que no resultan de utilidad por no ser interpretables.

7.6.4.2. Equipos de ensayo de bombeo

7.6.4.2.1. Equipos de bombeo, impulsión e instalación eléctrica

Los equipos de ensayo de bombeo suelen estar formados por un camión sobre el que se desplaza la bomba, la tubería de impulsión y el material accesorio necesario. Además, sobre el vehículo, suele estar instalado un grupo electrógeno y una grúa para el descenso y el ascenso de la bomba y de la tubería de impulsión.

La práctica totalidad de las empresas especialistas en la realización de ensayos de bombeo utilizan electrobombas sumergibles, conectadas a la columna de impulsión, compuesta por tuberías, habitualmente metálicas y unidas por bridas atornilladas, que conectan la bomba con la superficie del terreno.

En el exterior del pozo se suele colocar una tubería final de descarga, en general de mayor diámetro que la de impulsión, mediante un acoplamiento formado por un codo de 90° y el correspondiente carrete.

El control de la electrobomba se realiza mediante un regulador de frecuencia y de tensión, actuando directamente sobre las revoluciones del motor de combustión interna que acciona el grupo. La instalación eléctrica debe estar convenientemente protegida y conectada a tierra. El caudal de bombeo también se puede controlar mediante una válvula de llave colocada antes del equipo de medida de caudal. Actualmente, los equipos de bombeo suelen disponer de variadores de frecuencia con los que se facilita el control del caudal de bombeo.

7.6.4.2.2. Control del nivel piezométrico

Para controlar la profundidad del nivel piezométrico se deberán utilizar hidroniveles, dado que estos son los instrumentos para la medida del nivel del agua de uso más común por su precisión, fiabilidad y comodidad.

Actualmente, los hidroniveles tradicionales suelen ser sustituidos por sensores de nivel piezométrico, dado que estos registran de forma automática y en continuo la evolución del nivel a lo largo del tiempo.

Los sensores de nivel automáticos pueden ser mecánicos, de presión y neumáticos, siendo recomendable el uso de los sensores de presión, con la correspondiente compensación barométrica. No obstante, se recomienda que las lecturas de nivel en los puntos de control más importantes, como el pozo de bombeo y el piezómetro más cercano, se hagan siempre con hidroniveles tradicionales. De igual modo, en los puntos de control piezométrico donde se instalan sensores de nivel automáticos, se recomienda hacer comprobaciones de la profundidad del nivel con un hidronivel convencional antes, durante y al final del ensayo.

7.6.4.2.3. El tubo piezométrico

Con el fin de evitar enredos o atranques del cable (o cinta métrica) o del cabezal del hidronivel o de los sensores de nivel automáticos es necesaria la instalación de tubos guía en la columna de impulsión de los sondeos ensayados. Estos tubos deben ser rígidos, verticales y tener el diámetro suficiente para que la sonda o el sensor desciendan y asciendan sin roces excesivos.

Los tubos piezométricos para los hidroniveles convencionales suelen ser tubos metálicos roscados de 3/4 de pulgada de diámetro, aproximadamente. En el caso de los sensores automáticos de presión para el control del nivel piezométrico en el pozo de bombeo se suele instalar un tubo piezométrico roscado de PVC, con diámetro de 25,4 mm (1"), aunque el diámetro del tubo debe variar en función del diámetro del sensor.

En el caso de los tubos guía para la introducción de hidronivel será necesario que el tubo esté abierto por su fondo, mientras que en el caso de los sensores de presión además de estar abierto en el fondo es conveniente hacer algunas ranuras a lo largo del tubo para facilitar la entrada de agua.

En todo caso, el fondo del tubo piezométrico no debe quedar enfrentado a la rejilla de la bomba, porque se falsearían las medidas de nivel, siendo recomendable dejarlo uno o dos metros por encima de la aspiración.

7.6.4.2.4. Control del caudal

Se debe disponer de un sistema adecuado de aforo que permita de forma rápida y sencilla conocer el caudal de bombeo.

El dispositivo de medida de caudal con tubería con diafragma y tubo Pitot es el más habitual (figura 7.6.1). Su reducido coste, la facilidad de transporte y de manejo, los errores de medida (que suelen ser menores del 5 %), y la reducida afección de la turbidez hacen que sea muy utilizado.

Los sistemas de control más modernos y eficaces son los contadores de agua electromagnéticos. Su precio es elevado, pero cada vez es más frecuente su utilización por parte de las empresas especializadas en la realización de ensayos de bombeo. No generan pérdidas de carga y trabajan de forma excelente cuando hay sólidos en suspensión. Además, registran los datos de caudal de forma continua y pueden conectarse a dispositivos autómatas para ayudar a optimizar la variación del caudal de bombeo a lo largo del ensayo, con la ayuda de los variadores de frecuencia (Iglesias y Martos-Rosillo, 2010, 2013).

También es posible utilizar otros dispositivos menos adecuados como vertederos; su lectura es fácil, pero son difíciles de montar. No es recomendable, en captaciones recién terminadas, utilizar contadores de agua totalizadores que utilicen turbinas. Presentan problemas con las aguas turbias y la lectura de caudal no es inmediata. No obstante, cuando hay que hacer ensayos de bombeo en instalaciones fijas, que deben tener instalado un contador, su uso es prácticamente obligatorio.

Otros dispositivos de aforo como los métodos volumétricos, aforos en canales y las prácticas expeditivas son menos recomendables, pero también es posible emplearlos (Villanueva e Iglesias, 1984).

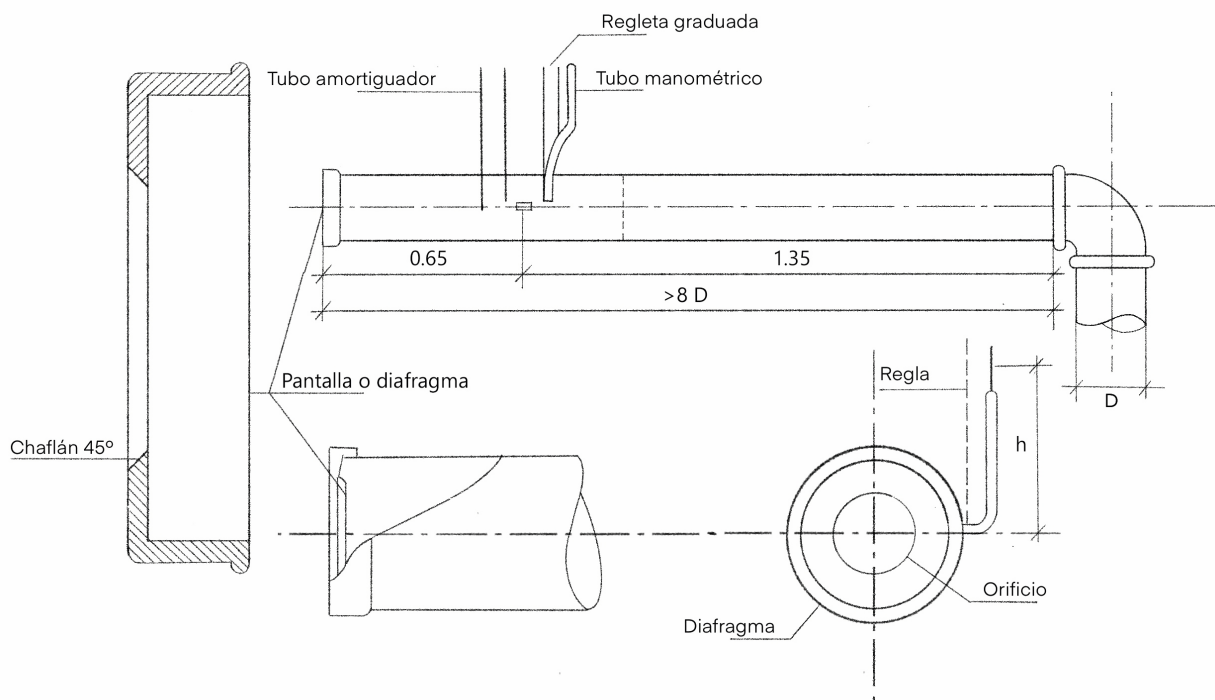


Figura 7.6.1. Esquemas donde se muestran algunos detalles del aforador mediante tubo con diafragma (Fuente: Villanueva y Iglesias, 1984).

7.6.5. Programa de bombeo y mediciones

Previamente a la realización de un ensayo de bombeo es preciso definir el alcance de la prueba, su duración, la metodología y la sistemática de control que se quiere realizar.

7.6.5.1. Aspectos previos al ensayo

Antes de iniciar una prueba de bombeo se debe comprobar que: i) los hidroniveles y los sensores de control piezométrico funcionan correctamente, ii) el medidor de caudal es adecuado y va a permitir hacer medidas instantáneas de caudal, iii) el grupo motobomba se encuentra en buen estado de funcionamiento y el generador o la fuente de alimentación de energía que se utilice asegure el bombeo sin interrupciones involuntarias, iv) existe un buen sistema para desaguar el agua bombeada.

7.6.5.2. Ensayos de bombeo escalonados

En pozos que van a tener una explotación pequeña ($<7000 \text{ m}^3/\text{año}$) la realización de un ensayo de bombeo escalonado y una posterior prueba de recuperación, usando el caudal ponderado de los escalones, puede ser suficiente para conocer el caudal recomendable de explotación y la profundidad a la que colocar la aspiración de la bomba. En pozos que van a tener una explotación importante siempre se debe hacer un ensayo de bombeo escalonado, para conocer la eficiencia hidráulica del pozo, seguido de un ensayo de bombeo de larga duración.

Los ensayos de bombeo escalonados requieren para su ejecución la aplicación de un mínimo de tres a cuatro escalones de caudal variable y creciente. Se trata, por tanto, de aplicar varios caudales de bombeo sucesivos y de igual duración (es muy frecuente emplear de 60 a 120 minutos en cada escalón) a caudal creciente pero constante en cada escalón.

Este tipo de ensayos puede realizarse con la recuperación total del nivel después de aplicar cada escalón de caudal (ver figura 7.6.2 A) o encadenando los escalones de caudal de forma consecutiva y haciendo una sola recuperación del nivel tras finalizar la fase de bombeo (figura 7.6.2 B).

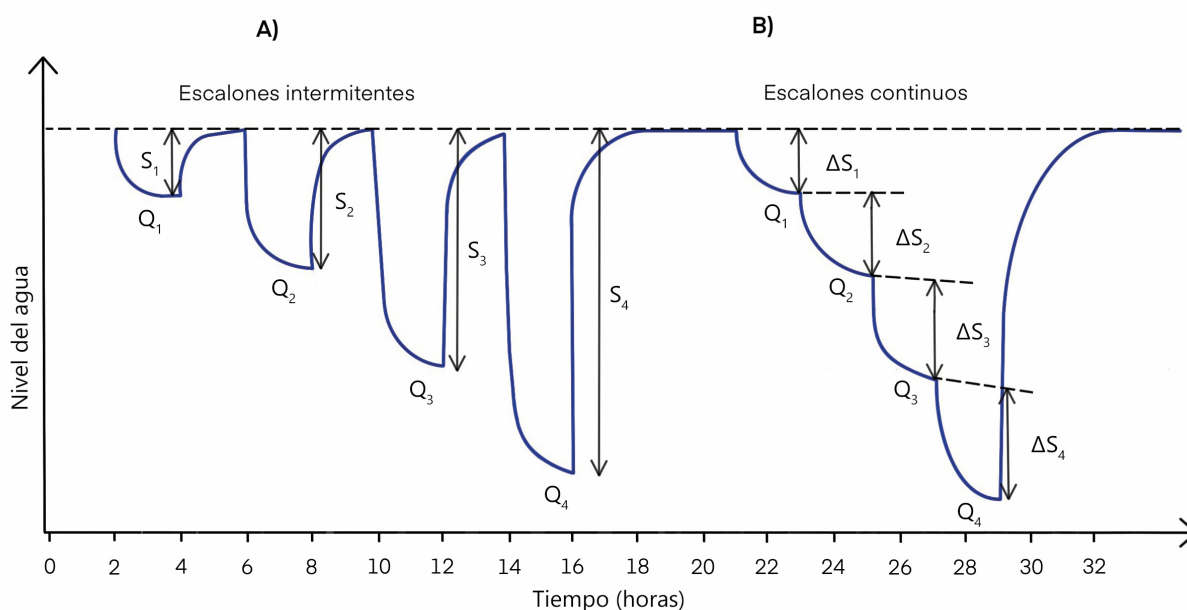


Figura 7.6.2. A) Evolución del nivel dinámico con el tiempo en un ensayo de bombeo a caudales escalonados, discontinuos con recuperación total del nivel entre escalones y B) evolución del nivel dinámico con el tiempo en un ensayo de bombeo a caudales escalonados continuos con recuperación final.

Los caudales aplicados deben cumplir la condición de estar en progresión aritmética de diferencia un tercio del caudal previsto que puede suministrar el pozo. En opinión de Misstear et al. (2017), para hacer el ensayo de bombeo escalonado se tiene que disponer de un equipo que permita explotar, al menos, un rango de caudales comprendido entre $1/3$ y $4/3$ del caudal previsto. De esta forma en un ensayo con cuatro escalones los caudales a aplicar serían los siguientes:

$$Q_1 = \frac{Q_{pre}}{3}, Q_2 = \frac{2Q_{pre}}{3}, Q_3 = Q_{pre}, Q_4 = \frac{4Q_{pre}}{3},$$

donde Q_n son los caudales a aplicar y Q_{pre} el caudal previsto que puede suministrar el pozo antes de realizar el ensayo de bombeo.

En caso de ser posible se pueden duplicar ($2Q_{pre}$) o triplicar ($3Q_{pre}$) los caudales previstos para provocar pérdidas de carga exponenciales en el pozo, siempre que el descenso de nivel no haga peligrar la estabilidad del pozo y que estas pérdidas de carga no sean desproporcionadas. Sin embargo, para aplicar muchos escalones de caudal se requieren equipos con una alta variabilidad en los valores del caudal, cuestión que no suele ser fácil de encontrar en el mercado.

En cualquier caso, al hacer un ensayo de bombeo escalonado se consiguen diferentes pares de valores caudal-descenso que permiten generar la curva característica del pozo, que no es más que la representación en un diagrama de dispersión del caudal frente al descenso del nivel que genera ese caudal (figura 7.6.3).

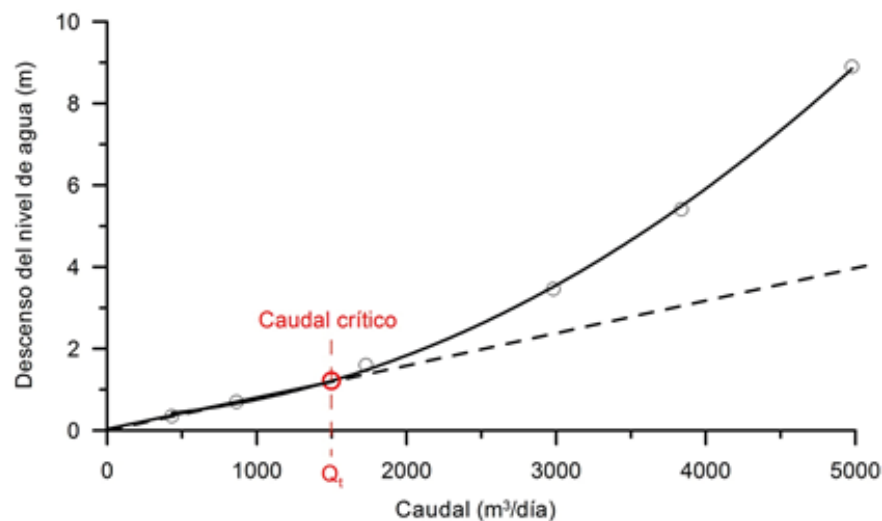


Figura 7.6.3. Curva característica (descenso vs caudal) de un pozo en el que se han aplicado seis escalones de caudal.

Para el primer tramo de la curva, con caudales bajos o muy bajos, los descensos siguen una evolución lineal en forma de recta, que es igual a la evolución del descenso teórico. A partir de un determinado caudal (Q_t en la figura 7.6.3), la curva se separa de la recta de descenso teórico creciendo de modo exponencial, debido a las pérdidas de carga por la entrada de agua en el sondeo. A ese caudal, se le denomina caudal crítico (Q_t). Por lo anterior, el primer tramo de la curva característica debe ser recto para que no existan pérdidas de carga exponenciales por la entrada de agua en régimen turbulento en el pozo. Posteriormente hay que aplicar mayores caudales de bombeo, para que la curva pase a crecer de forma exponencial.

La obtención de esos pares de valores de caudal vs descenso permite el cálculo de las pérdidas de carga en el pozo, aplicando los métodos gráficos convencionales (Custodio y Llamas, 1983, Villanueva e Iglesias, 1984) y mediante el uso de códigos informáticos para su cálculo automático como es el caso del programa PIBE (Delgado y Padilla, 2018), disponible en <https://ciclohidrico.com/download/pibe-v32/>

7.6.5.3. Ensayos de bombeo de larga duración

En los sondeos que van a explotar una gran cantidad de agua, como es el caso de los dedicados al abastecimiento de una población, al suministro de una zona regable extensa o para cualquier otro tipo de uso que demande una cantidad de agua importante, es esencial realizar ensayos de bombeo escalonados combinados con un ensayo de bombeo y recuperación de larga duración, tal y como se ha representado en la figura 7.6.4.

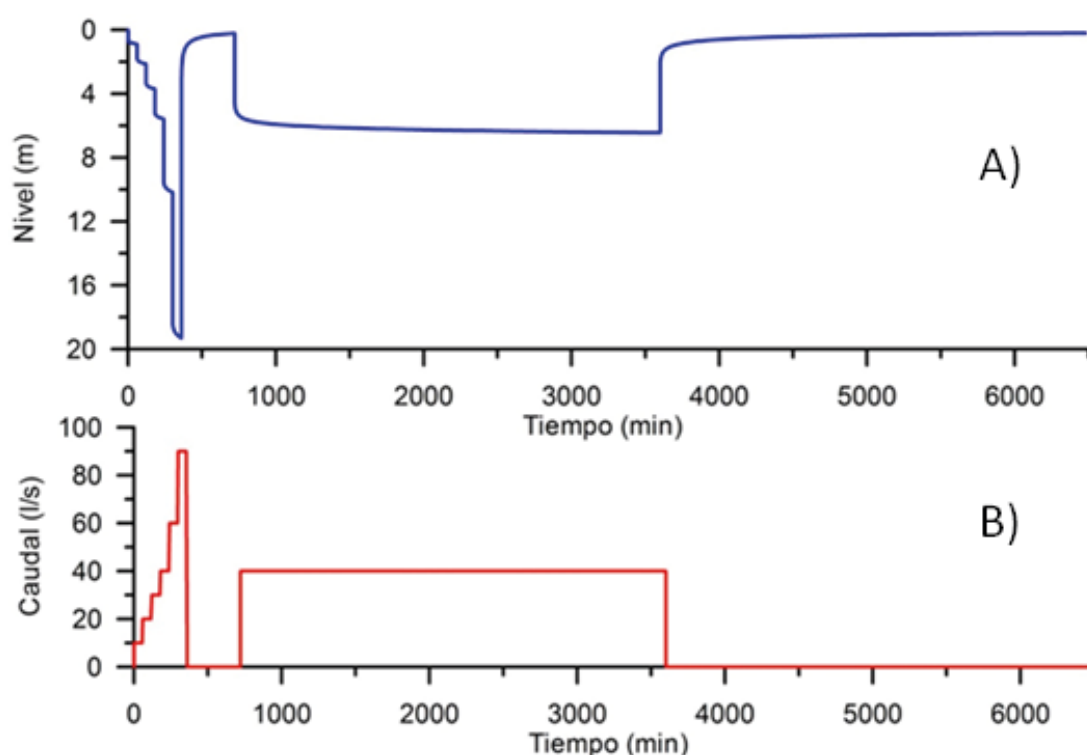


Figura 7.6.4. A) Gráficos de profundidad del nivel vs tiempo y B) de caudal vs tiempo en un ensayo de bombeo en los que se combina un primer ensayo de bombeo escalonado con recuperación del nivel y un posterior ensayo de bombeo de larga duración y caudal constante con una posterior recuperación del nivel inicial.

La instalación electromecánica y la infraestructura hidráulica que acompaña a un pozo de este tipo absorben una parte importante del presupuesto que requieren estas obras. Por este motivo el ensayo de bombeo del pozo es esencial. Del ensayo resulta el caudal aconsejable de explotación y la potencia que requiere la bomba para elevar ese caudal. Ambos parámetros son críticos para el diseño adecuado de la instalación eléctrica y de las conducciones de transporte del agua desde el interior del pozo a su lugar de destino.

Procediendo con un primer ensayo de bombeo escalonado se consigue una correcta determinación de los parámetros hidráulicos. Con un ensayo de larga duración a caudal constante se obtiene una estimación de los parámetros hidráulicos del acuífero.

Los ensayos de bombeo de larga duración se deben hacer con un solo caudal (figura 7.6.5), para analizar con detalle la respuesta del acuífero, y acabar con un ensayo de recuperación, que cubra como mínimo del 10 al 15 % del tiempo de bombeo. Con estos ensayos además de calcular los principales parámetros hidráulicos del acuífero se puede determinar, en muchas ocasiones, la presencia de bordes impermeables o de recarga, el efecto de interferencia de otros pozos de bombeo e incluso el área de embalse subterráneo del acuífero.

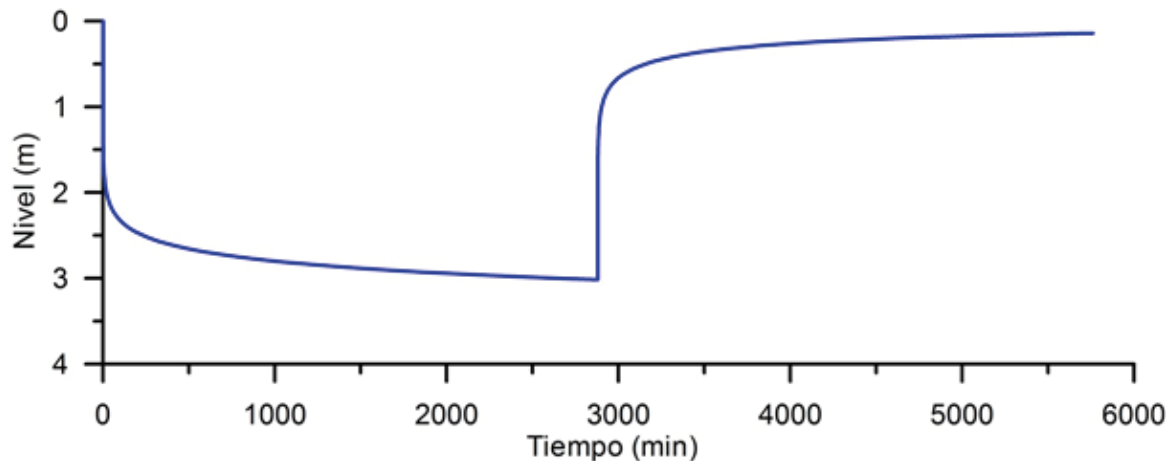


Figura 7.6.5. Ensayo de bombeo de larga duración con un caudal constante de bombeo y con la posterior recuperación del nivel.

Independientemente del caudal con el que se explotará un pozo en el futuro, hay ensayos de bombeo en condiciones particulares que obligan a alargar la duración de la prueba. Los más frecuentes se dan al ensayar pozos de bombeo de gran diámetro, por el efecto de capacidad; cuando se ensayan acuíferos kársticos, en los que el sondeo ha interceptado una red de conductos kársticos o una gran cavidad saturada (efecto de capacidad); en pozos incompletos y/o que no son totalmente penetrantes en el acuífero; en acuíferos semiconfinados; en acuíferos con drenaje diferido, etc. (Custodio y Llamas, 1983 y Villanueva e Iglesias, 1984).

En otras ocasiones durante el ensayo se alcanza un límite del acuífero inesperado, positivo (embalses, ríos, etc.) o negativo (bordes impermeables), lo que obliga a modificar la duración del ensayo. En cualquier caso, la estabilización de un ensayo de bombeo al alcanzar un límite positivo hace innecesaria la prolongación de la prueba.

Son necesarios ensayos de bombeo de varios días de duración y de gran caudal cuando los estudios hidrogeológicos previos señalan la posibilidad de que el acuífero ensayado tenga una reducida área de recarga y pueda presentarse un efecto de vaciado. Si existen posibilidades de vaciado del acuífero nunca hay que quedarse con la duda. En estos casos también debe alargarse la prueba de recuperación.

7.6.5.4. Partes de bombeo y mediciones

El parte de bombeo es el documento donde constan todas las mediciones e incidencias del ensayo de un modo ordenado. Es un documento imprescindible que condicionará la correcta interpretación de un ensayo.

En el parte se deben anotar todas las mediciones realizadas durante el ensayo, tanto en el pozo de bombeo como en los piezómetros de control, así como las principales características del equipo de bombeo, el nivel estático, etc., y todas las incidencias y anomalías que surjan durante el ensayo (turbidez, color del agua bombeada, toma de muestras, dificultad de regular el caudal, lluvia, sonido de caída de agua durante la recuperación, cambio de turno, cambio de revoluciones del motor, etc.). Estas anotaciones marginales pueden ser de gran utilidad para la interpretación de ciertas distorsiones que suelen aparecer al representar los datos que se obtienen en campo.

La cadencia de medidas del nivel piezométrico, de precisión centimétrica, debe ser tal que se distribuyan uniformemente en una escala logarítmica, dado que es en esta escala donde se representarán los tiempos.

Una cadencia adecuada puede ser la que se indica:

- Medidas cada minuto de 0 a 15 minutos de iniciado el escalón de bombeo o de recuperación.
- Medidas cada 5 minutos de 15 a 30 minutos de iniciado el escalón de bombeo o recuperación.
- Medidas cada 10 minutos de 30 a 60 minutos de iniciado el escalón de bombeo o recuperación.
- Medidas cada 15 minutos de 1 hora a 2 horas de iniciado el escalón de bombeo o recuperación.
- Medidas cada 30 minutos de 2 horas a 4 horas de iniciado el escalón de bombeo o recuperación.
- Medidas cada hora de 4 horas a 8 horas de iniciado el escalón de bombeo o recuperación.
- Medidas cada dos horas después de 8 horas de iniciado el escalón de bombeo o recuperación.

Otra cadencia de medida muy utilizada es la siguiente (en minutos): 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2300, 2600, 3000.

En cualquier caso, no es demasiado importante tomar las medidas un poco antes o un poco después, lo verdaderamente importante es dar con exactitud la hora a la que se toma la medida.

La gran capacidad de almacenamiento de los sensores de nivel piezométrico disponibles en el mercado permite programar lecturas de nivel con cadencias de medidas mucho menores a las indicadas.

Se quiere subrayar que medir el caudal es tan importante como medir el nivel piezométrico. Por eso es conveniente anotar, en el parte de bombeo, el caudal con más frecuencia de lo que se suele hacer.

En el Anexo III de esta guía se adjuntan algunos modelos de parte de bombeo.

7.6.5.5. Control de parámetros físico-químicos y toma de muestras de agua

Es conveniente realizar medidas durante el ensayo de las características físico-químicas del agua bombeada. Para su medida es preciso contar con equipos portátiles de medición. Los aparatos portátiles fundamentales son conductivímetro, pH-metro, medidor de potencial redox (Eh-metro) y termómetro. Previamente a su utilización en campo todos los aparatos deben ser debidamente calibrados de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

En los sondeos en los que es necesario conocer la calidad del agua hay que proceder a su muestreo y análisis. Usualmente, si solo se va a analizar una muestra, esta se debe recoger minutos antes de finalizar la prueba. En todo caso, siempre es conveniente proceder a la toma de una muestra al inicio del ensayo (por si se produce una avería del equipo de bombeo) cuando se haya vaciado un volumen equivalente a 3 o 4 veces el volumen del agua contenido en el pozo o cuando se estabilicen la conductividad eléctrica del agua, su pH y la temperatura.

Para la toma de muestras es preciso contar con los adecuados recipientes para su posterior envío al laboratorio. Antes de muestrear, hay que conocer el volumen de agua necesario, tipo de recipiente, necesidad de aditivos, condiciones de transporte, tiempo máximo de almacenamiento antes del análisis, etc. Para ello es conveniente que los especialistas del laboratorio de análisis especifiquen el procedimiento de muestreo y de transporte de las muestras.

Siempre se debe hacer un buen etiquetado de las muestras. Hay que anotar el nombre del sondeo, lugar de muestreo, la fecha y la hora exacta de muestreo y el nivel dinámico. Si se dispone de conductímetro y pH-metro es conveniente anotar la temperatura, la conductividad eléctrica y el pH.

7.6.6. Interpretación de los ensayos de bombeo y elaboración del informe final del ensayo

Una vez obtenidos los valores de descenso-tiempo para uno o para varios caudales predeterminados se inicia la fase de interpretación de los resultados. La interpretación del ensayo se realizará de forma diferente según se considere al acuífero como libre, confinado o semiconfinado. Además, el método de interpretación seleccionado tendrá en cuenta que el ensayo se haya realizado bajo régimen transitorio o régimen permanente. Siempre es recomendable que el ensayo se interprete aplicando más de un método, para posteriormente realizar una revisión crítica de los resultados.

En la actualidad existen bastantes programas para la interpretación automática de ensayos de bombeo, con los que se pueden modelizar los ensayos tanto en régimen permanente como en régimen variable. Un ejemplo de un programa libre y en castellano es PIBE (anteriormente mencionado), desarrollado por el Ciclo Hídrico de la Diputación de Alicante, que se puede descargar en <https://ciclohidrico.com/download/pibe-v32/>. Estos programas además de ajustar los ensayos de bombeo, aplicando los métodos analíticos interpretativos de la hidráulica de captaciones, permiten, una vez calibrados los parámetros hidrogeológicos del acuífero y las pérdidas de carga en el pozo, simular cuál será la evolución del nivel piezométrico, en el pozo de bombeo y en piezómetros situados a diferentes distancias, con unas condiciones de bombeo a establecer por el usuario. Este tipo de simulaciones facilitan la labor de los técnicos a la hora de establecer cuál será la posición más adecuada de la bomba de aspiración para distintos regímenes de bombeo.

El informe final de un ensayo de bombeo debe incluir un apartado en el que se especifiquen la ubicación, las características constructivas y la columna litológica del sondeo ensayado y de los piezómetros de control si los hubiere.

El ensayo de bombeo escalonado debe tratarse por separado, presentando la curva característica del pozo y especificando los caudales y los tiempos de bombeo y recuperación aplicados.

En el apartado correspondiente al análisis del ensayo de bombeo de larga duración se deben presentar los gráficos de descenso-tiempo correspondientes, tanto del ensayo de bombeo como de la recuperación. Es necesario indicar los métodos aplicados para ajustar el ensayo y presentar los resultados, haciendo el análisis pertinente tanto del bombeo como de la recuperación.

La interpretación de la información físico-química y la de la calidad del agua bombeada durante el ensayo de bombeo debe constar en un capítulo del informe dado que es importante para conocer la calidad del agua de la captación para sus distintos usos y aplicaciones.

Finalmente, se deberán determinar el caudal y el régimen de bombeo recomendado, así como la profundidad aconsejable para la colocación de la aspiración del equipo de bombeo, su diseño y potencia. Es importante recomendar que la instalación disponga siempre de un tubo piezométrico de un diámetro mínimo de 3/4 de pulgada (19 mm), donde se puedan seguir los niveles ante cualquier eventualidad o estudio futuro.

7.7. Protección sanitaria del pozo

7.7.1. Introducción

Muchos de los problemas de contaminación y de mantenimiento de un pozo de explotación de agua subterránea se pueden minimizar diseñando y ejecutando una adecuada protección sanitaria de su cabezal.

La protección sanitaria de la cabeza de un pozo consta de tres elementos esenciales: el sello sanitario o losa de hormigón, el cierre del conjunto cabeza de la entubación-salida de la tubería de impulsión y la caseta protectora. El diseño adecuado de la cabeza de un pozo debe conseguir una adecuada sujeción del equipo de bombeo, permitir el control del caudal, del nivel y de la calidad del agua, evitar la entrada de contaminantes en el pozo, proteger el pozo de actos vandálicos, daños accidentales, inundaciones y de la congelación, facilitando, además, las operaciones de mantenimiento para que estas sean más seguras.

Existen muchos pozos que tienen su cabezal en el interior de arquetas excavadas en el suelo. Se consigue de este modo reducir el impacto visual del pozo y minimizar los riesgos de heladas. Sin embargo, los cabezales de pozo que se encuentran bajo tierra son muy peligrosos para las operaciones de mantenimiento. Ya se han producido numerosos accidentes fatales durante la extracción e introducción del equipo de bombeo. Por otro lado, y como se indica en Misstear et al. (2017), los cabezales contruidos bajo tierra dificultan la evacuación del agua que cae al suelo de las válvulas instaladas a la salida de la tubería. Las arquetas son difíciles de limpiar y son, por tanto, más proclives a la contaminación. De hecho, un estudio realizado en el sureste de Inglaterra determinó que los brocales de pozo instalados en arquetas subterráneas tenían más riesgo de contaminación microbiológica con respecto a los que tenían el brocal en superficie (Boak y Packman, 2001). Por todo lo anterior, se recomienda, siempre que sea posible, construir los cabezales de pozo sobre la superficie del terreno.

7.7.2. Sello sanitario o losa de cimentación

Se denomina sello sanitario de un pozo a la losa de hormigón con armadura que debe rodear al entubado más externo del pozo que queda en superficie. Esta losa debe ser solidaria con la cementación y la tubería más externa del emboquille del pozo (figura 7.7.1 A) y en su defecto con la cementación del propio entubado de revestimiento (figura 7.7.1 B).

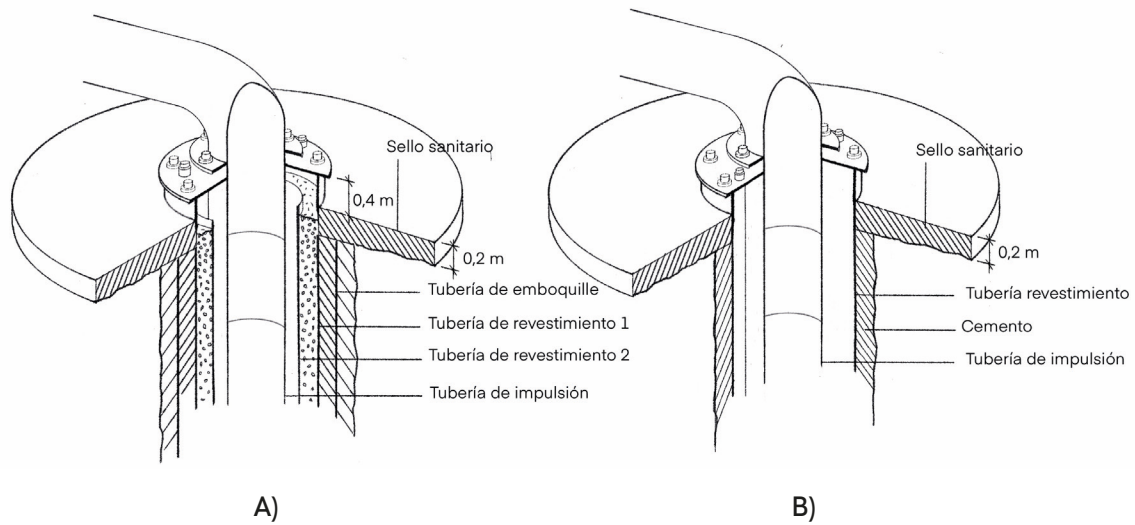


Figura 7.7.1. A) Sello sanitario o losa de cimentación de un pozo que dispone de una entubación de emboquille cementado más un anular de cementación adicional. B) Sello sanitario unido a la tubería de revestimiento.

La losa debe tener una ligera pendiente hacia afuera, variable en función de si el sondeo queda en el exterior o en el interior de una caseta. Debe tener una superficie de entre 1 y 10 m², aunque la mayoría de las normas la cifran en 3 m², que equivale aproximadamente a una placa circular de 1 m de radio respecto a la tubería del pozo.

En los casos en los que sobre el cabezal del pozo se va a construir una caseta, la losa de hormigón debe extenderse a toda la superficie de la solera de la caseta de protección (figura 7.7.2).

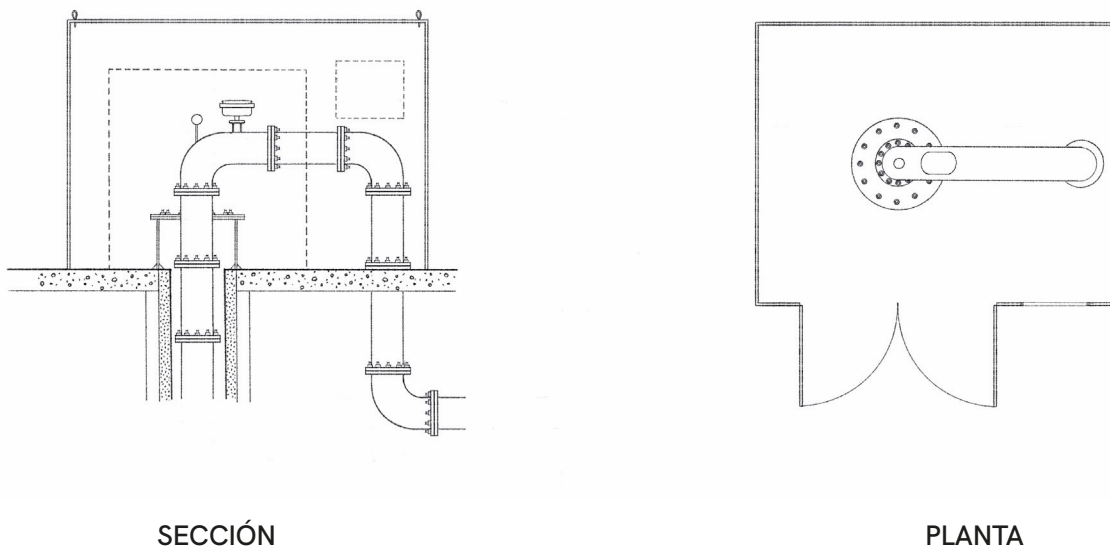


Figura 7.7.2. Vista en planta y sección del sello sanitario o losa de hormigón de un pozo alojado en el interior de una caseta metálica retirable.

En este caso, el sello sanitario se extiende para cumplir, también, como solera de la caseta. La caseta metálica móvil, unida con pernos a la losa de hormigón o sello sanitario del pozo, dispone de unas argollas en el techo para su retirada con grúa durante las operaciones de mantenimiento que lo requieran.

7.7.3. Cierre de la cabeza del sondeo

En los pozos que quedan instalados con una bomba electro-sumergible se requiere un sistema de sujeción y afianzamiento de la tubería de impulsión en el emboquille del sondeo. Las formas más usuales de fijar la columna de entubación consisten en la utilización de abarcones simples, abarcones de charnela y sistemas de placa sostén.

El abarcón simple consta de dos perfiles en forma de “U” con una hendidura semicircular en el centro, que se enfrentan rodeando completamente a la tubería de impulsión. Estos perfiles se atornillan entre sí y se apoyan en el brocal del pozo. Desafortunadamente son muy utilizados. Su uso debería estar prohibido dado que dejan abierta la boca del pozo, con el consiguiente riesgo de caída de objetos y productos contaminantes en su interior.

Por el contrario, los abarcones de charnela (figura 7.7.3) cierran totalmente el cabezal del pozo y facilitan la movilización del equipo de impulsión durante las operaciones de mantenimiento. Estos abarcones disponen de dos placas opuestas que giran sobre unas bisagras soldadas al emboquille. Las tapas presentan dos aberturas semicirculares, con el diámetro de la tubería de impulsión, tubería que queda suspendida de la brida superior del último tubo. El sistema es muy cómodo, dado que para cualquier maniobra solamente se requiere levantar un poco la impulsión y replegar la chapa. Este tipo de abarcón debe quedar elevado un mínimo de 60 cm de la cota del suelo.



Figura 7.7.3. Cierre con abarcón tipo charnela elevado 60 cm sobre la cota del suelo. Fuente: AQUATEC.

Por último, el brocal puede quedar totalmente tapado cuando se utiliza un sistema de placa sostén o placa de anclaje, con una elevación de seguridad de al menos 60 cm con respecto a la del suelo.

Esta placa consiste en una tapa metálica, cuadrada o circular, que se suelda a la tubería de impulsión del último tubo (se recomienda que el último tramo sea muy corto, de 0,5 a 1 m) y se apoya sobre el brocal del pozo (figura 7.7.4). La utilización de este sistema de placa de anclaje permite la presurización del sondeo cuando se instalan cierres prensa en cada uno de los orificios de salida que se deben practicar en la chapa y entre los que deben encontrarse el tubo piezométrico de medida de niveles, los de las mangueras de alimentación de la bomba, el cable de protección de nivel y los tubos para medidores neumáticos o de presión del nivel.

No se consideran en esta guía los pozos instalados con bombas de eje vertical. En todo caso el propio motor de la bomba y la bancada de asentamiento suelen actuar de cierre del pozo, garantizando la estanqueidad del sistema, sin olvidar los dispositivos para permitir la medición del nivel del agua en el pozo.

Debe señalarse la existencia de diferentes cierres de pozo comercializados. En EE. UU., las administraciones de los distintos estados tienen en sus páginas web el listado de los cierres prefabricados aprobados y certificados y sus marcas comerciales.



Figura 7.7.4. Cierre estanco con placa de anclaje unida a la tubería de emboquilla del sondeo con brida y tornillería. Elevación de seguridad de 60 cm sobre la cota del suelo. Fuente: AQUATEC.

7.7.4. Caseta de protección

La caseta de protección del cabezal de un pozo protege al sondeo frente a actos vandálicos o intromisiones externas en la instalación. La protección sanitaria se consigue con la cementación del cabezal del pozo, el sello sanitario superficial y el sellado de la salida de la tubería de impulsión del

pozo. Por ello, aunque el pozo esté en una caseta no deben, en ningún caso, obviarse los elementos de protección indicados.

Existe también cierta discusión respecto a si el cabezal del pozo debe quedar dentro de una caseta de protección o no. Es cierto que la caseta proporciona seguridad, pero al mismo tiempo no es menos cierto que la caseta dificulta enormemente las operaciones de mantenimiento y de rehabilitación de un pozo. Donde se han tenido en cuenta este tipo de consideraciones, se ha optado por dejar el cabezal del pozo sin cubrir, haciendo una caseta contigua donde se colocan todas las válvulas y el equipo de control (figura 7.7.5). Si se opta por esta opción, es esencial conseguir un sellado correcto de la boca del pozo y un vallado perimetral de toda la instalación.

Otra opción perfectamente factible consiste en proteger el pozo con una caseta metálica, que se puede unir a la losa de hormigón del sello sanitario con pernos o tirafondos móviles, y con unas argollas en la parte superior para quitarla con la propia grúa que extrae el equipo de impulsión durante las operaciones de mantenimiento (figuras 7.7.2 y 7.7.5).

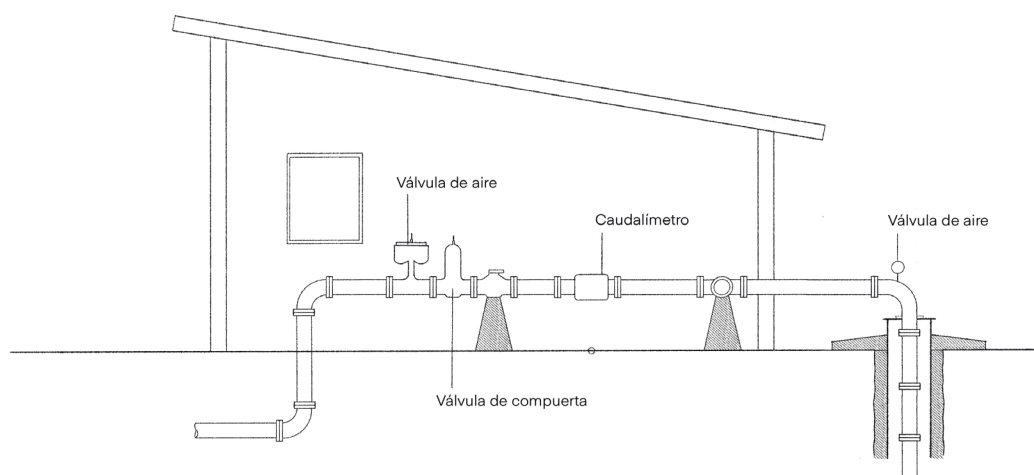


Figura 7.7.5. Sondeo con cabezal de pozo en superficie y sin cubrir, junto al que se construye una caseta con la valvulería correspondiente y el equipo de control.

7.8. Desinfección

7.8.1. Introducción

Durante la ejecución de un sondeo y cuando se realizan operaciones de reperforación, de desarrollo o de limpieza, se introducen equipos e instrumental que pueden estar contaminados microbiológicamente. Para reducir este tipo de contaminación, es recomendable seguir unas pautas, mientras que para eliminarla se debe proceder a la desinfección del pozo una vez que se han finalizado las actuaciones. Como es obvio, este tipo de actuaciones deberían ser obligatorias cuando el pozo se va a destinar al abastecimiento humano.

Se indican en esta guía una serie de recomendaciones al respecto, señalando, en todo caso, la existencia de numerosos y detallados manuales de desinfección de pozos, la mayoría escritos en inglés, entre los que destaca el de la División de Aguas del Departamento de Calidad Medioambiental de Michigan (Holben y Gaber, 2020).

7.8.2. Criterios de buenas prácticas para evitar la contaminación bacteriológica del pozo

En los pozos de nueva construcción, el primer aspecto a tener en cuenta para minimizar las posibilidades de contaminación microbiológica, durante el proceso constructivo, consiste en aplicar criterios de buenas prácticas, tanto en la fase constructiva como en la de desarrollo.

En este sentido, es importante señalar que las tuberías que van a ser instaladas en un pozo deben estar limpias, desinfectadas y haber estado tapadas en sus extremos durante todo su periodo de almacenaje y transporte. Así mismo, las rejillas de los pozos de bombeo y las bombas que vienen embaladas de fábrica deben permanecer así hasta que son instaladas en el pozo.

Una práctica, que debería ser exigida, consiste en la desinfección de la sarta de perforación y de los equipos de bombeo y desarrollo que van a ser introducidos en una perforación. Un simple lavado con agua clorada a presión (10 ppm de cloro residual) sería suficiente. Asimismo, es obvio señalar que el agua utilizada en la perforación debe ser agua potable.

Los sondeos que han estado en desuso y que se pretenden rehabilitar para su nueva puesta en marcha requieren de una limpieza y desinfección preliminar. En estos casos será necesario, en primer lugar, eliminar o extraer las posibles obstrucciones u objetos existentes en el interior, cepillar en su caso la tubería de revestimiento y, si es necesario, realizar las reparaciones necesarias, así como una limpieza con pistoneo, inyección a presión o sistema mixto, o bombeo energético con "air lift" hasta obtener agua limpia. Una vez hecha esta limpieza preliminar, habrá que proceder a su desinfección.

7.8.3. Productos desinfectantes y dosificación

Los productos desinfectantes utilizados comúnmente para la desinfección de pozos son el hipoclorito sódico líquido (lejía), en sus concentraciones de 5,25 % de cloro (lejía doméstica) y 12,5 % (industrial) y el hipoclorito cálcico en polvo, granular o en pastillas (60-70 %). Distintos autores recomiendan el uso del hipoclorito de sodio frente al hipoclorito de calcio en la desinfección de pozos por su mayor eficiencia (Mansuy, 1999; Schnieders, 2001). En todo caso, se desaconseja totalmente el vertido de pastillas de hipoclorito de calcio desde la superficie, dado que estas se disuelven lentamente y acaban en el fondo del pozo, dando lugar a altas concentraciones de cloro en el fondo, que pueden provocar distintas reacciones químicas que generan precipitados, o incluso, afectar a la tubería de impulsión, cuando el pozo está instalado, al quedar atrapadas en la parte superior de la bomba (Aid, 1987). Por lo anterior, en caso de utilizar este producto, se deben disolver en un tanque con agua y luego inyectar en el pozo.

Las concentraciones de cloro libre recomendadas en las distintas normativas consultadas están comprendidas entre 50 mg/l y 200 mg/l. Nunca deben sobrepasarse los 500 mg/l, pues resultan soluciones muy corrosivas.

En las tablas 7.8.1 y 7.8.2 se pueden obtener las cantidades, en mililitros, de lejía doméstica o industrial necesaria por metro de columna de agua en pozos de distintos diámetros, para conseguir concentraciones de cloro libre 50, 100, 150 y 200 mg/l.

Diámetro del pozo (cm)	Volumen de agua por metro de profundidad de agua (l)	Volumen de lejía doméstica necesaria (ml)			
		Para obtener 50 mg/l por cada metro de profundidad de agua	Para obtener 100 mg/l por cada metro de profundidad de agua	Para obtener 150 mg/l por cada metro de profundidad de agua	Para obtener 200 mg/l por cada metro de profundidad de agua
6	3	3	5	8	10
11	9	9	18	27	37
13	14	14	28	42	56
16	20	20	40	59	79
18	27	27	53	80	106
21	34	34	69	103	138
61	292	292	583	875	1167
76	456	456	912	1367	1823
91	656	656	1313	1969	2625

Tabla 7.8.1. Volumen de lejía doméstica (con concentraciones de cloro del 5 %) necesaria para obtener concentraciones de cloro libre de 50, 100, 150 y 200 mg/l en pozos de diámetros comprendidos entre 60 y 910 mm.

Diámetro del pozo (cm)	Volumen de agua por metro de profundidad de agua (l)	Volumen de lejía industrial necesaria (ml)			
		Para obtener 50 mg/l por cada metro de profundidad de agua	Para obtener 100 mg/l por cada metro de profundidad de agua	Para obtener 150 mg/l por cada metro de profundidad de agua	Para obtener 200 mg/l por cada metro de profundidad de agua
6	3	1	2	3	4
11	9	4	8	11	15
13	14	6	12	17	23
16	20	8	16	25	33
18	27	11	22	33	44
21	34	14	29	43	57
61	292	122	243	365	486
76	456	190	380	570	760
91	656	273	547	820	1084

Tabla 7.8.2. Volumen de lejía industrial (con concentraciones de cloro del 12 %) necesaria para obtener concentraciones de cloro libre de 50, 100, 150 y 200 mg/l en pozos de diámetros comprendidos entre 60 y 910 mm.

La solución desinfectante que se consigue de la mezcla de agua con el hipoclorito sódico se debe hacer en un depósito y en un sitio ventilado. El volumen de solución a preparar debe ser, al menos, cinco veces superior al volumen de la tubería de revestimiento del pozo. Es decir, hay que calcular el volumen del interior de la tubería de revestimiento y multiplicarlo por cinco.

$$V_i = 5 \times \pi \times R_t^2 \times h,$$

donde:

V_i es el volumen de solución desinfectante a inyectar,

R_t es el radio interior de la tubería de revestimiento, y

h es la profundidad total del pozo.

Si la formación perforada es muy permeable se recomienda aumentar la cantidad de solución desinfectante antes indicada. Se conseguirá de este modo una cantidad suficiente de solución para que esta llegue a todo el pozo y al acuífero situado en la zona más próxima a la captación.

La adición de cloro al agua debe realizarse en un área bien ventilada. Los vapores de hipoclorito o cloro gaseoso pueden concentrarse en zonas cerradas y poco ventiladas y pueden causar problemas respiratorios graves.

Algunos autores recomiendan reducir el pH del agua a la que va a ser añadida la lejía a 4,5 antes de añadir el hipoclorito sódico, empleando para ello ácido acético o ácido sulfámico. La manipulación de este tipo de ácidos y la formación de gases al mezclarse con la lejía pueden ser peligrosas, por lo que es recomendable que esta operación sea realizada por personal cualificado.

En todo caso, hay que agregar la cantidad de hipoclorito necesaria hasta alcanzar concentraciones comprendidas entre 50 y 200 mg/l de cloro, siendo recomendable esta última concentración para hacer la operación más efectiva (Schnieders, 2001). Si se usa hipoclorito de calcio como fuente de cloro, hay que disolverlo bien antes de agregarlo al tanque de mezcla. No se recomienda su uso en aguas con más de 100 ppm de calcio disuelto.

Antes de inyectar la solución desinfectante en el pozo hay que verificar la concentración de cloro libre resultante y su pH. Para una máxima eficacia bactericida, el pH final de la solución de cloro debe estar comprendido entre 6 y 7. Se debe disponer, por tanto, de algún dispositivo, como kits colorimétricos o tiras de control del cloro libre y de pH para comprobar que la mezcla se ha realizado correctamente. Debe tenerse en cuenta que las tiras reactivas de pH pueden no funcionar después de que se haya agregado el cloro a la solución debido al efecto blanqueador del cloro en las tiras.

7.8.4. Aplicación del desinfectante

Antes de inyectar la solución el pozo debe haber sido limpiado, quedando el agua clara. Normalmente esto suele haberse conseguido tras el ensayo de bombeo que se realiza en el pozo antes de decidir si este va a ser explotado o no.

Es conveniente hacer la desinfección del pozo cuando este ya está instalado con su equipo de bombeo. Así se desinfecta también el equipo de bombeo y se puede remover y recircular el agua con el propio equipo de bombeo del pozo.

La inyección puede realizarse desde superficie en pozos que no sean muy profundos. El caudal de inyección debe ser alto para conseguir una buena limpieza de la tubería que queda en la zona no saturada del acuífero. Si el pozo está instalado se puede hacer un *bypass* y recircular el agua inyectada durante un periodo de al menos media hora. Después de la recirculación, se puede dejar la solución desinfectante en el pozo durante un periodo de 4 a 12 horas o durante la noche (Lehr et al., 1988). Finalmente, se debe proceder a bombear el agua y al control de su pH y contenido en cloro libre, hasta que el agua vuelva a sus parámetros naturales.

En pozos contruidos en formaciones muy permeables o que tienen amplias zonas de rejilla se recomienda inyectar el agua a presión desde el interior del pozo, con dispositivos de *jetting* acoplados a una tubería auxiliar de inyección (figura 7.8.1). En ese caso, se debe comenzar desde el fondo del sondeo e ir elevando la herramienta de inyección paulatinamente. Se recomienda concentrar las labores de inyección en el fondo del pozo, en las rejillas y en la zona donde se situará el nivel dinámico. Una vez hecha esta operación y después de haber instalado el equipo de bombeo, se puede proceder a hacer otra desinfección con el procedimiento antes descrito.

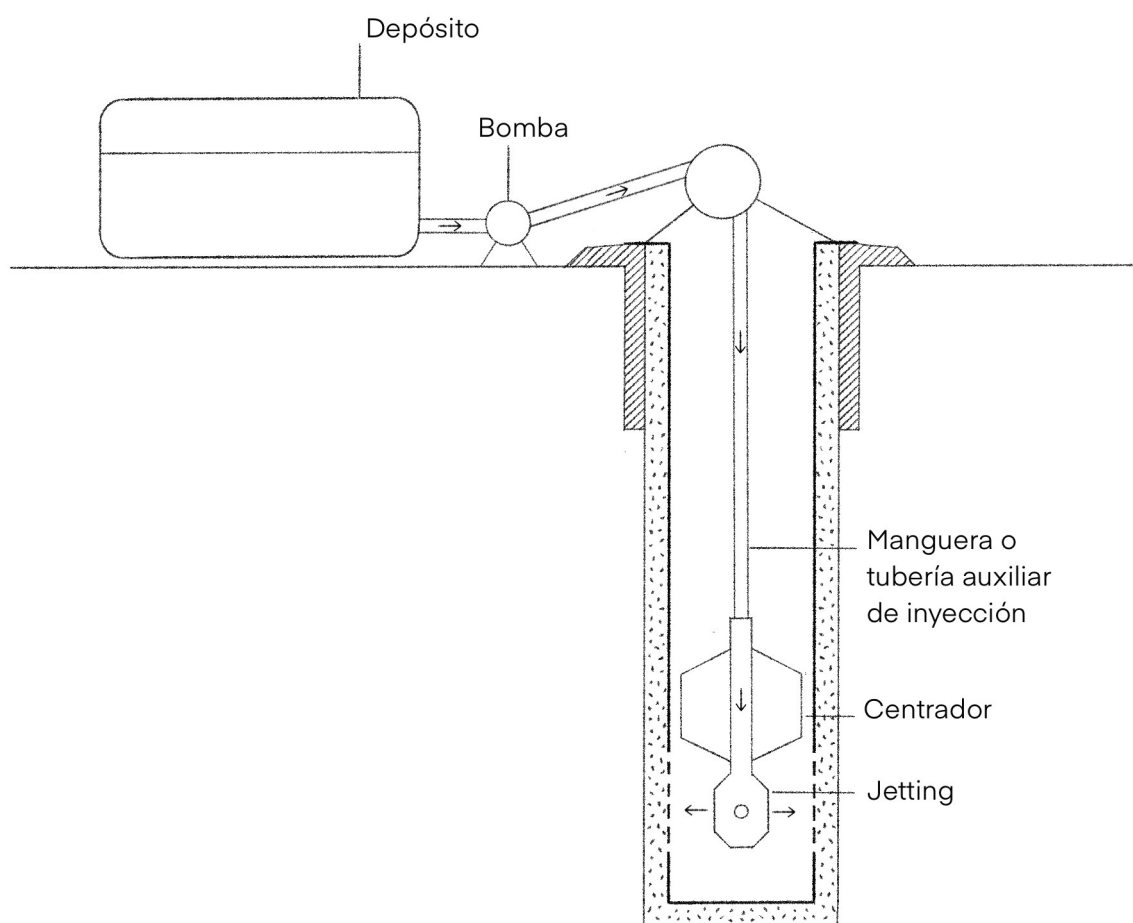


Figura 7.8.1. Procedimiento de desinfección de un pozo mediante un sistema de inyección a presión.

8. Informe final

8.1. Introducción

La realización del informe final de la construcción de un sondeo es esencial, tanto si resulta positivo, como si resulta negativo. Un sondeo permite conocer la litología y la estructura del subsuelo, así como conocer las características hidrogeológicas del lugar donde se realiza. Por ello, conseguir esta información y compartirla es esencial. Además, cuando se realiza el informe final de un sondeo este podrá ser consultado posteriormente por su propietario, por su operador, o por cualquier técnico, para poder diagnosticar o resolver potenciales problemas derivados de su uso. En este sentido, también debe ser recordado lo importante que es disponer de esta información para poder hacer un correcto sellado de la captación una vez finalizada su vida útil.

El informe final debe mostrar las características finales de la captación realizada, las diferencias con la obra proyectada, que deben ser justificadas, y las recomendaciones pertinentes para su instalación y/o para su abandono y posterior sellado.

A continuación, se presenta el índice de la memoria, los planos y los anexos que debería incluir un informe final de un pozo de captación de aguas subterráneas.

8.2. Contenido del informe final de un sondeo

El índice que se propone a continuación debe tomarse sólo como un guion de referencia, que tendrá que adaptarse a cada caso en concreto:

MEMORIA

1. Introducción y objetivos del sondeo
2. Situación de la captación
3. Encuadre geológico e hidrogeológico
4. Descripción de la obra prevista según proyecto original
5. Sistema de perforación
6. Características del equipo de perforación
7. Características técnicas de la perforación
 - a. Profundidad y diámetros de perforación
 - b. Profundidad, diámetro, espesor y tipo de tubería/rejilla
 - c. Macizo o prefiltro de grava
 - d. Cementaciones
 - e. Sello sanitario
 - f. Cierre de cabeza
8. Testificación geológica y geofísica/Perfil litológico
9. Niveles piezométricos durante la perforación y caracterización de zonas productivas
10. Ensayos de bombeo
 - a. Equipos de bombeo y esquema de la instalación utilizado durante el ensayo
 - b. Ensayo de bombeo escalonado
 - c. Ensayos de bombeo de larga duración
 - d. Ensayo de recuperación
 - e. Recomendaciones
11. Características físico-químicas del agua
12. Resumen y recomendaciones

PLANOS

1. Plano de situación a escala 1:50.000
2. Plano de emplazamiento a escala 1:5.000
3. Esquema constructivo, columna litológica y niveles piezométricos

ANEXOS

1. Esquema del sondeo
2. Partes de perforación y del ensayo de bombeo
3. Registros geofísicos y ópticos
4. Análisis realizados: químicos, granulométricos, paleontológicos, etc.
5. Reportaje fotográfico del desarrollo de los trabajos
6. Ficha resumen

8.3. Ficha de inventario de pozos

En todos los informes finales de un sondeo se debe incluir una ficha con el resumen de la principal información de la obra realizada. Cuando se construye un pozo se genera información geológica e hidrogeológica sobre una porción de un acuífero que probablemente no ha sido investigada antes. Esta información debe ser archivada de forma sistemática, para que los que trabajen en esa zona en el futuro puedan consultarla.

Algunos organismos públicos, como el Instituto Geológico y Minero de España o la Confederación Hidrográfica del Ebro, disponen de unas fichas resumen, conocidas como fichas de inventario de puntos de agua, en las que se puede sintetizar la información que resulta tras la ejecución de una captación de aguas subterráneas, estando diseñadas para facilitar el traslado de esta información a la base de datos AGUAS del IGME (<https://info.igme.es/BDAguas>).

Referencias mencionadas en el texto

Agencia Catalana de l'Aigua (ACA). 2009. Guia que conté els criteris tècnics per a la reposició del domini públic hidràulic en els supòsits d'extinció, abandonament i clausura temporal d'aprofitaments d'aigües subterrànies. Guia pràctica 1. 53 pp.

AIH-GE. 2022. Guía de buenas prácticas para el diseño, construcción, sellado y clausura de pozos de captación de agua subterránea. ISBN: 978-84-920529-7-4. 258 pp.

Aid, F. 1987. Well Chlorination and Submersible Motors, Franklin Aid, Vol 5, No.1/Jan/Feb 1987.

Australian Drilling Industry Training Committee Limited. 1997. Drilling: The manual of methods, applications and management. CRC Press. Taylor and Francis Group.

Bayó, A. 1996. Apuntes XXX del Curso Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona. Inédito.

Bayó, A. 1999. Alfons Bayó i Dalmau. Homenaje. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona. 229 pp.

Boak, R.A. y Packman, M.J. 2001. A methodology for the assessment of risk of cryptosporidium contamination of groundwater. Quarterly Journal of Engineering, Geology and Hydrogeology 34:187 - 194.

Bölsenkötter, H., Busse, R., Diederich, G., Holting, B., Hohberger, K., Regenhardt, H., Sehloz, W., Willinger, E. y Werner, J. 1984. Hydrogeologische kriterien beder bemessung von Wasserschutzgebieten für Grundwasserfassungen. Geologisches Jahrbuch Reihe C. Heft 36. Hannover 1984.

Direcció General de Recursos Hídricos del Gobierno de las Islas Baleares. 2013. Normativa Pla Hidrològic de les Illes Balears. Annex 2. Condicions tècniques execució i abandó de pous.

Custodio, E. y Llamas, M. R. 1983. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega.

Decreto 108/2005 de 21 de octubre, por el que se regulan las condiciones técnicas de autorizaciones y concesiones de aguas subterráneas y de ejecución y abandono de los sondeos en el ámbito de las Illes Balears. BOIB núm. 163 de 29 octubre 2005, pág. 69-71.

Delgado, J. y Padilla, A. 2018. PIBE. Programa de Interpretación de Bombeos de Ensayo. Diputación de Alicante.

Department of Environmental Protection (DEP). 2001. Water- Well Abandonment Guidelines. In Ground Water Monitoring Guidance Manual. Department of Environmental Protection- Commonwealth of Pennsylvania. 61-70.

Driscoll, F. 1986. Groundwater and Wells. Johnson Filtration Inc. Division, St. Paul. Minnesota.

Gaber, B.O. y Fisher, M.S. 1988. Michigan Water Well Grouting Manual. Ground water control section, Michigan Department of Public Health. Lansing, MI. 83 pp.

Holben, R.J. and Gaber, M. 2020. Michigan's Water Well Disinfection Manual. Michigan Department of Environment. https://www.michigan.gov/documents/deq/deq-wb-dwehs-wcudisinfmanual_221334_7.pdf

Hurst, A., Griffiths C.M. y Worthington, P.F. 1992. Geological applications of wireline logs II. Geological Society, London, UK, Special Publication 65.

Iglesias, A. y Martos Rosillo, S. 2010. Apuntes del I Seminario sobre interpretación de ensayos de bombeo. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos. Madrid.

Iglesias, A. y Martos-Rosillo, S. 2013. Medidas "in situ" de parámetros hidráulicos de acuíferos. Curso on line de Hidrogeología Aplicada. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos. Madrid. 91 pp.

- Keary, P., Brooks, B.M. y I. Hill. 2002. An introduction to geophysical exploration. Blackwell Science Ltd, Oxford, U.K.
- Kruseman, G.P. y De Ridder, N.A. 1975. Análisis y evaluación de los datos de ensayos de bombeo. 212 pp.
- Lehr, J., Hurlburt, S., Gallagher, B. y Voytek, J. 1988. Design and construction of water wells, National Ground Water Association.
- Mansuy, N. 1999. Water well rehabilitation: A practical guide to understanding well problems and solutions. CRC Press.
- Martínez-Navarrete, C. y García-García, A. 2003. Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio. Instituto Geológico y Minero de España. 306 pp.
- Martos-Rosillo, S., Martín-Machuca, M., Martín, D., Ruiz, F., Pérez, F. y Martínez, A. 2007. Perforación de sondeos de explotación de aguas subterráneas en mármoles cámbrios karstificados de la Sierra de Aracena (Huelva). En: "XXII Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales". Oviedo.
- Martos-Rosillo, S., Martín, M., Martín, D., Ballester, A. y Díaz, A. 2006. Nuevas técnicas de perforación y testificación de sondeos de investigación hidrogeológica en materiales carbonáticos. El caso de la Sierra de Estepa (Sevilla). III Simposio Internacional del Karst. Karst, cambio climático y aguas subterráneas. Durán, J. J.; Andreo, B. y Carrasco, F. (eds.), Instituto Geológico y Minero de España. Málaga. 161-171.
- Martos-Rosillo, S., Barba-Romero, J., Domínguez, J.A. 2004. Experiencia en la realización de sondeos a rotoperforación/rotación con aire en circuito de circulación inversa, en el ámbito de la Comunidad Valenciana. VIII Simposio de Hidrogeología. Zaragoza, 27, 577-586.
- Martos-Rosillo, S., Durán-Valsero, J.J. y Morales, R. 2018. El agua subterránea en la Historia. De cómo la humanidad se ha abastecido mediante aguas subterráneas desde el Paleolítico hasta la época de las catedrales góticas. Colección Planeta Tierra. Instituto Geológico y Minero de España-Los Libros de la Catarata. Madrid. 142 pp.
- MITECO (2025a) Guía técnica para la clausura y sellado de captaciones de aguas subterráneas Reglamento del Dominio Público Hidráulico R.D. 849/1986 - R.D. 665/2023; anexo III, partes A y B. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/guia_captaciones_aguas_subterraneas_210126.pdf
- MITECO (2025b) Guía para el diseño y dimensionamiento de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano (PPCSb) Reglamento del Dominio Público Hidráulico R.D. 849/1986 - R.D. 665/2023. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/esquema-ppsa/Guia_perimetros_-_version_web_141125.pdf
- Mejías, M., Benítez de Lugo, L., López-Sáez, J.A. y Esteban, C. (eds.). 2015. Arqueología, hidrogeología y medio ambiente en la Edad del Bronce de La Mancha. La Cultura de las Motillas. Ministerio de Economía y Competitividad-Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 120 pp.
- Minnesota Department of Health. 2011. The Rules Handbook, A Guide to the Rules Relating to Wells and Borings, Minnesota Rules, Chapter 4725. <https://www.health.state.mn.us/communities/environment/water/wells/rules/ruleshandbook.html>
- Missteart, B., Banks, D. and Clark, L. 2017. Water wells and boreholes. John Wiley & Sons. 498 pp.
- Morell, I. 2004. Terminación de sondeos. Entubación, ranurado y cementación. Empaque de gravas. Desarrollo de sondeos de captación: principales métodos. Ventajas e inconvenientes. Grupo de gestión de recursos hídricos - Universitat Jaume I de Castelló. Inédito.

- Moss, R. and Moss, G.E. 1990. Handbook of ground water development. New York. Wiley-Interscience
- National Ground Water Association (NGWA). 2017. Water Well Construction Standard. NGWA-01-14. 36 pp.
- National Uniform Drillers Licensing Committee (NUDLC). 2020. Minimum Construction Requirements for Water Bores in Australia. National Water Commission. 140 pp.
- Ohio EPA's Division of Drinking and Ground Water. 2009. Technical Guidance Manual for Ground Water Investigations Chapter 9 Sealing Abandoned Monitoring Wells and Boreholes. 14 pp. State of Ohio. Environmental protection Agency.
- Peinado, T. 2019. Guía para entender el uso de las aguas subterráneas en el abastecimiento urbano de pequeñas poblaciones. Instituto Geológico y Minero de España. 90 pp.
- Plan Hidrológico de las Islas Baleares. Normativa, Anejo 2: Condiciones técnicas para la ejecución y abandono de sondeos y/o pozos. 2015.
- Rehse, W. 1977. Abbaubare organische Verunreinigungen pathogene Keime und Viren-Rapport n° 401 77 Eidgenössisches Amt für Umweltschutz Office de l'Environnementá Berne.
- Schlumberger. 1989. Log interpretation principles and applications. Schlumberger Ltd. Houston, USA.
- Schnieders, J. H. 1988. Water Systems Engineering, Inc., Well Chlorination, Water Well Journal, February 1988.
- Singhal, B. B. S. y Gupta, R. P. 2010. Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer Science & Business Media. 375 pp.
- State Coordinating Committee on Ground Water. 1996. Technical guidance for sealing unused wells. State of Ohio. 52 pp.
- Twining, B.V., Bartholomay, R.C., and Hodges, M.K.V., 2012, Completion summary for borehole USGS 136 near the Advanced Test Reactors Facility, Idaho National Laboratory, Idaho: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2012-5230 (DOE/ID-22220), 32 p., plus appendixes.
- Villanueva, M. 2006. Captación de aguas subterráneas mediante sondeos profundos. 166 pp.
- Villanueva, M. e Iglesias, A. 1984. Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. 426 pp.
- Water Security Agency. 2013. Decommissioning abandoned water wells. Saskatchewan. 5 pp.

Referencias normativas

- Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas. Boletín Oficial del Estado, núm. 176, de 24 de julio de 1973.
- Ley 7/1985, de 2 de abril, Reguladora de las Bases del Régimen Local. Boletín Oficial del Estado, núm. 80, de 3 de abril de 1985.
- Real Decreto 863/1985, de 2 de abril, por el que se aprueba el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera. Boletín Oficial del Estado, núm. 140, de 12 de junio de 1985.
- Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. Boletín Oficial del Estado, núm. 103, de 30 de abril de 1986.

Directiva 89/391/CEE del Consejo, de 12 de junio de 1989, relativa a la aplicación de medidas para promover la mejora de la seguridad y de la salud de los trabajadores en el trabajo. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, L 183, de 29 de junio de 1989.

Directiva 92/91/CEE del Consejo, de 3 de noviembre de 1992, relativa a las disposiciones mínimas de seguridad y de salud en las industrias extractivas por sondeos. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, L 348, de 28 de noviembre de 1992.

Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales. Boletín Oficial del Estado, núm. 269, de 10 de noviembre de 1995.

Real Decreto 487/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la manipulación manual de cargas que entrañe riesgos, en particular dorsolumbares, para los trabajadores. Boletín Oficial del Estado, núm. 97, de 23 de abril de 1997.

Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual. Boletín Oficial del Estado, núm. 140, de 12 de junio de 1997.

Real Decreto 1215/1997, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo. Boletín Oficial del Estado, núm. 188, de 7 de agosto de 1997.

Real Decreto 1389/1997, de 5 de septiembre, por el que se aprueban las disposiciones mínimas destinadas a proteger la seguridad y la salud de los trabajadores en las actividades mineras. Boletín Oficial del Estado, núm. 240, de 7 de octubre de 1997.

Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación. Boletín Oficial del Estado, núm. 266, de 6 de noviembre de 1999.

Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, L 327, de 22 de diciembre de 2000.

Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. Boletín Oficial del Estado, núm. 176, de 24 de julio de 2001.

Ley 54/2003, de 12 de diciembre, de reforma del marco normativo de la prevención de riesgos laborales. Boletín Oficial del Estado, núm. 298, de 13 de diciembre de 2003.

Real Decreto 171/2004, de 30 de enero, por el que se desarrolla el artículo 24 de la Ley 31/1995, de Prevención de Riesgos Laborales, en materia de coordinación de actividades empresariales. Boletín Oficial del Estado, núm. 27, de 31 de enero de 2004.

Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de diciembre de 2006, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro. Diario Oficial de la Unión Europea, L 372, de 27 de diciembre de 2006.

Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica. Boletín Oficial del Estado, núm. 162, de 7 de julio de 2007.

Real Decreto 1514/2009, de 2 de octubre, por el que se regula la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro, en transposición de la Directiva 2006/118/CE. Boletín Oficial del Estado, núm. 255, de 22 de octubre de 2009.

Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. Boletín Oficial del Estado, núm. 296, de 11 de diciembre de 2013.

Anexo I. Normativa internacional

Los primeros estándares técnicos internacionales fueron publicados por la American Water Works Association (AWWA) en 1948 y se actualizan periódicamente. De ellos se derivan de uno u otro modo todos los demás. La AWWA, junto con la agencia estadounidense National Water Well Association, así como la United States Environmental Protection Agency (USEPA), fueron pioneras en la recomendación de unos estándares para la construcción y abandono de pozos, con la intención de que cada estado los considerase como un requerimiento mínimo necesario. Los primeros "Standards for Deep Wells" publicados fueron en castellano en 1968, en traducción de J. R. Llamas, en el Boletín de Informaciones y Estudios núm. 30 del Servicio Geológico de Obras Públicas. Los primeros estándares legales a los que se ha tenido acceso son los del Estado de California publicados en 1968 siendo gobernador Ronald Reagan. A continuación, se recoge una recopilación de toda la normativa internacional encontrada.

África

Argelia

Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger (SEAAL) direction de production et ressources SEAAL "Normes de construction et d'exploitation d'un forage", 15 de julio de 2015.

Chad

Ministère de la Pêche, de l'Hydraulique Pastorale et Villageoise "normes et standards de forage manuels au Tchad", julio de 2009.

Malawi

Ministry of agriculture, irrigation and water development "Technical Manual - Water Wells and Groundwater Monitoring Systems", noviembre de 2016.

Nigeria

Standards Organization of Nigeria "Code of Practice for Water Well Construction", 2010. ICS 23.040.10.

Sierra Leona

Ministry of Water Resources "Principles of Borehole Construction and Rehabilitation in Sierra Leona", octubre de 2014. Manual con fotos, esquemas y fichas para la correcta ejecución de las obras.

Somalia

WASH Cluster Somalia. 2020. Technical Guidelines for the Construction, Rehabilitation of Drilled Water Wells. Este documento es la guía oficial de la construcción y rehabilitación de pozos. Se ha realizado por el consorcio liderado por el WASH Cluster Somalia, y con las aportaciones de UNICEF, GSA, STC, WOCCA, ACTED y el Ministerio de Energía y Recursos hídricos de Somalia.

Sudáfrica

Department of Water Affairs and Forestry Chief Directorate: Community Water Supply and Sanitation and Directorate: Geohydrology "Minimum standards and guidelines for groundwater resource development for the community water supply and sanitation programme", abril de 1997.

Togo

Ministère de l'agriculture, de l'élevage et de l'hydraulique "Guide technique de réalisation, de protection, de gestion et d'abandon des forages d'eau, diciembre de 2015. Esta guía está auspiciada por la FAO. Tiene unos esquemas ilustrativos muy interesantes tanto de construcción como de clausura.

Uganda

Ministry of Water and Environment "Technical Specifications for drilling, test pumping, pump installation and associated Works", enero de 2019. RFP No. NWE/CONS/16-17/00024/1. Recoge fotos, formularios de tramitación y descripción técnica de todos los trabajos.

América

Argentina, Uruguay

Proyecto Concordia-Salto. Ministerio de Asuntos Hídricos de Santa Fe. Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (Rep. Argentina) y Ministerio de Transporte y Obras Públicas-Dirección Nacional de Hidrografía (República Oriental de Uruguay). Proyecto de Norma para el "Acuífero Guaraní" (2005).

Bolivia

NB 689-Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable vol. 1 y 2. Contiene diversos reglamentos entre otros: Reglamento Técnico de Diseño de Pozos Profundos para Sistemas de Agua Potable. MINERM. De obligado cumplimiento para los pozos de agua para consumo humano.

Brasil

La Asociación Brasileira de Normas Técnicas ha editado las siguientes normas:

- ABNT-NBR 12212. Poço tubular-Projeto de poço tubular para captação de água subterrânea.
- ABNT-NBR 12244 Poço tubular-Construção de poço tubular para captação de água subterrânea.
- ABNT-NBR 15495-1 Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares. Parte 1:Projeto e Construção; Parte 2: Desenvolvimento.
- ABNT-NBR 15492 Sondagem de reconhecimento para fins de qualidade ambiental-Procedimento.
- ABNT-NBR 15847 Amostragem de água subterrânea em poços de monitoramento-Métodos de purga.

Estas normas no son por sí solas de obligado cumplimiento, pero las normas legales de los distintos estados las convierten en obligatorias (p.e. la Instrução Técnica DPO nº006. Estado de Sao Paulo).

Colombia

Norma Técnica Colombiana NTC-5539 (2007). Esta norma es una adaptación de la versión de 1997 de la ANSI (AWWA A100-97). A nivel legal, tiene el carácter de mínimos sin perjuicio de que la Administración territorial pueda exigir en su legislación condiciones más estrictas en función de las condiciones locales.

Costa Rica

- Reglamento de perforación de pozos 35882.
- Reglamento de trámite de pozos 35884.

El Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA) fija las normas técnicas concretas y los recursos extraíbles para cada zona hidrogeológica.

El Salvador

Norma Técnica para la perforación de pozos profundos en la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados. De obligado cumplimiento (como mínimos) para los pozos de dicha Administración o certificados por la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados ANDA.

México

Norma oficial mexicana NOM-003-CNA-1996. Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos. Norma Técnica de mínimos de obligado cumplimiento para todos los pozos. Como guía para la aplicación de la Norma: "Manual de diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Perforación de Pozos y Rehabilitación de Pozos" editado por el órgano administrativo de la Comisión Nacional del Agua.

Norma Oficial Mexicana NOM-004-CNA-1996. Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general.

Nicaragua

NTON 09006-11 (2011). Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense-Requisitos Ambientales para la Construcción, Operación y Cierre de Pozos de Extracción de Agua. Establece los mínimos obligatorios para todos los pozos (salvo los excavados a mano).

Uruguay

Decreto 86/2004 (modificado por Decreto 224/2004). Norma técnica de construcción de pozos perforados para captación de aguas subterráneas.

Venezuela

Normas técnicas para la ubicación, construcción, protección, operación y mantenimiento de pozos perforados destinados al abastecimiento de agua potable. Decreto número 2.048 (sept. 1997). Norma de mínimos de obligado cumplimiento en todo el territorio sin perjuicio de que el "geólogo inspector" pueda imponer condiciones más estrictas.

Canadá

Alberta

Alberta Regulation 205/98 Water Act. Water (Ministerial) Regulation. Part 7 Water Wells. El gobierno de Alberta ha editado una guía técnica para facilitar la aplicación de la Norma: "Water Wells that last for generations" (Revisión 2013).

Prince Edward Island

Environmental Protection ACT R.S.P.E.I., Section 25. Cap. 9. Revisado y en vigor en 2006.

Ontario

Test Holes and Dewatering Wells and Best Management Practices.

Ontario Water Resources ACT RRO 903 (Regulation 903 o Wells Regulation). El Estado ha editado un manual para la correcta aplicación de la norma "Water Supply Wells. Requirements and Best Management Practices. 2009".

British Columbia

2004 Ground Water Protection Regulation. Sustituye a "Guidelines for minimum Standards in Water Well Construction" de 1982.

La BC Ground Water Association ha editado el "Ground Water Protection Regulation Handbook" que es un sencillo manual con ilustraciones muy claras.

Quebec

Règlement sur le captage des eaux souterraines (Q-2, r.1.3) de 2004. Modificado por la revisión de 2009 de la "loi sur la qualite de l'environnement" pasa a ser el Q-2, r.6.

El gobierno de Quebec ha editado dos guías técnicas para facilitar la correcta aplicación de dicha norma:

- Guide d'interpretation Technique du Règlement sur le captage des eaux souterraines (Q-2, r.1.3) que ya contempla las modificaciones citadas.
- Guide technique. Captage d'eau souterraine pour résidences isolées.

Saskatchewan

Water Authority Act (2005) S-35-03. SR172/66 The Ground Water Regulations ha editado un sencillo manual: "A landowner's Guide to Water Well Management".

Estados Unidos

Como ya se ha dicho al principio de este anexo los primeros estándares se publicaron por la AWWA en 1948. De ellos se derivan de un modo u otro todas las demás. Por otro lado, muchas de las normas de los distintos estados son auténticos manuales técnicos que facilitan su aplicación.

California

La primera norma legal que se ha localizado que aplica los estándares de la AWWA fue el "Water Well Standards: State of California" Bulletin n° 74 publicado en 1968 por The Resources Agency (Dept. of Water Resources) siendo gobernador del Estado el Sr. Ronald Reagan.

Posteriormente se publica en 1981 el Bulletin 74-81 "Water Well Standards: State of California". Finalmente, en 1991 se publica el Bulletin 74-90 que es un suplemento al 74-81 y que lo complementa en aspectos como sondeos de monitoreo, protección catódica, etc... Existe una publicación integrada consultable en internet. Distintos "territorios" completan estas regulaciones con las suyas concretas p.e. San Joaquin County. Well Standards (San Joaquin County Ordinance Code Section 9-1115.6 2005).

Minnesota

Minnesota Rules, Chapter 4725, Rules Relating to Wells and Boring (2008). El Minnesota Department of Health ha editado "Rules Handbook. A guide to the Rules Relating to Wells and Borings. Minnesota Rules, Chapter 4725" que es un auténtico manual técnico de aplicación de las normas.

Kansas

Department of Health and Environment. Article 12. Groundwater exploration and Protection Act (1993). Contiene abundantes esquemas para facilitar la aplicación de las normas.

Ohio

Los pozos para abastecimiento público están regulados en el Ohio Administrative Code Chapter 3745.

Los pozos para uso privado vienen regulados por el "Ohio Revised Code Chapter 3701". Los materiales, construcción, tratamiento, rehabilitación y cementación vienen recogidos en el Code Chapter 3701-28.

La documentación a remitir a la Administración, en ambos casos, viene definida en "Ohio Revised Code Section 1521.05".

Como guía para la aplicación de las normas el estado de Ohio ha editado:

- Technical Guidance for Well Construction and Groundwater Protection, 2000.
- Technical Guidance for Sealing Unused Wells, 1996.

Montana

Department of Environmental Quality Rules. ARH Title 17, chapters 30, 36 and 38. Para todo tipo de pozos.

Los mínimos estándares aplicables a todos los pozos figuran en el “Board of Water Well Contractors”. No obstante, el DEQ puede imponer condiciones más estrictas para los pozos públicos y multiuso.

Virginia

State Board of Health. Department of Health 12 VAC 5-630-30; State Water Control Board 12 VAC 5-630-60 (Department of Environmental Quality, Waste Management Division). Estas normas regulan los pozos para captación de aguas, tanto públicos como privados.

Los pozos de observación o monitoreo y los de remediación se rigen por la norma 12 VAC 5-630-420 de este último departamento (1992).

Arizona

Arizona Administrative Code. Title 12. Natural Resources. Chapter 15 Department of Water Resources. Article 8. Well Construction and licensing of Wells Drillers (2011).

Idaho

Idaho Water Resource Board. ITAPA 37.03.09 “Well Construction Standards Rules” (2009).

Estas normas son aplicables a todos los pozos de agua, sondeos de observación, sondeos de inyección, sondeos de protección catódica y sondeos de geotermia de baja temperatura tanto de circuito abierto como cerrado. Gráficos explicativos. Actualizado a 2010. Contiene esquemas muy claros.

Georgia

Georgia Code. Title 12. Conservation and natural resources. Chapter 5. Water Resources. Article 3. Wells and Drinking Water. Part 3. Water Well Standards. Se conoce de manera simplificada como “Water Well Standards Act of 1985”.

Michigan

“Water Well Construction and Pump Installation Code”, sections 12701-12715 (12714;-Part 1-Well Construction Code). Sintético pero completo.

Oregon

Oregon Administrative Rules 690-210 (Well Construction Standards). Son los mínimos aplicables a todos los pozos de agua. La administración puede imponer normas más estrictas en casos concretos. Los sondeos horizontales y los de remediación se rigen por la norma 690-200. Presenta esquemas muy ilustrativos.

Colorado

“Rules and Regulations for Water Well Construction, Pump Installation, Cistern Installation and Monitoring and Observation Hole/Well Construction” (o el título corto de “Water Well Construction Rules”). Contiene esquemas muy ilustrativos para distintos tipos de pozos y acuíferos.

Nebraska

Nebraska Health and Human Services. Regulations and Licensure (178NAC12). Título 178 Water Well Standards. Chapter 12 Water Well Construction, Pump Installation and Water Well Decommissioning Standards. Esquemas.

Wisconsin

Wisconsin Administrative Code Chapter NR812. Well Construction and Pump Installation. De aplicación a todas las captaciones de agua y monitoreo. A los efectos de abandono incluye a los sondeos mineros y de otro tipo al igual que respecto a la prohibición de vertido de sustancias contaminantes. Dispone de esquemas de instalaciones de cierre y cabeza de pozo.

Louisiana

Department of Transportation and Development Office of Public Works.

- “Rules, Regulations and Procedures for Registering Water Wells and Holes” (1985).
- “Rules, Regulations and Standards for constructing Water Wells and Holes” (1985).

New Jersey

Well Construction and Maintenance; Sealing of Abandoned Wells N.J.A.C.7:9D. Todos los subcapítulos: 7:9D-1 a 7:9D-4. Sin información gráfica (2007).

North Carolina

NORTH CAROLINA ADMINISTRATIVE CODE TITLE 15A. Department of Environment and Natural Resources. Division of Water Quality. Subchapter 2C Section. 0100: Well Construction Standards. Para todo tipo de captaciones de agua.

Delaware

Department of Natural Resources and Environmental Control I. Del. Admin. C., 7301 Regulations Governing the Construction and Use of Wells (2012).

Missouri

Missouri Department of Natural Resources. Division of Environmental Quality. “Missouri Well Construction Rules: Private Water Wells, Heat Pump Systems, Pump Installation and Monitoring Wells”. Divide el Estado en zonas en función del tipo de acuíferos (2009).

Utah

Rule 655-4 (1 al 16). La Division of Water Right ha editado el “Water Well Handbook” que recoge la normativa y una serie de apéndices sobre formularios de tramitación, documentación a presentar, etc (2011).

Illinois

Illinois administrative code. Title 77: Public Health. Chapter I: Department of Public Health. Subchapter r: Water and Sewage. Part 920: Water Well Construction Rules. Revisión de 2004.

Hawaii

Department of Land and Natural Resources. Hawaii Well Construction and Pump Installation Standards (2004).

Nevada

Department of Conservation and Natural Resources. Division of Water Resources. Regulations for Water Well and Related Drilling. NAC 534 and NRS 534 (Revised and adopted June 2006 and 2009 Nevada Revised Statutes Related to Underground Water and Wells).

Australia

"Minimum Construction Requirements for Water Bores in Australia". Documento realizado por National Uniform Drillers Licensing Committee (NUDLC, 2020) compuesto por representantes de la industria (Australian Drilling Industry Association y Australian Drilling Industry Training Committee) y representantes de las Administraciones de los distintos territorios.

Son los estándares mínimos a aplicar en toda Australia sin perjuicio de que los distintos territorios puedan exigir requisitos más estrictos

Europa

Francia

Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau.

El Ministerio de Ecología y del Desarrollo Sostenible ha publicado en 2004 una muy buena guía de aplicación de esta norma.

En Francia existen dos normas AFNOR relacionadas:

- "NF X10-999 (2007) Forage d'eau et de géothermie. Réalisation, suivi et abandon d'ouvrages de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages". Afecta a todos los sondeos sea cual sea el volumen de extracción. Aunque no es de obligado cumplimiento, de acuerdo a la norma citada al principio, para las captaciones de consumo doméstico de menos de 1000 m³/año, las empresas afiliadas al SEF se comprometen según los estatutos a cumplirla.
- NF X10-970 (2011). Forage d'eau et géothermie. Sonde géothermique verticale (échangeur géothermique vertical en U avec liquide caloporteur en circuit fermé).

Alemania

Ley de Gestión de Recursos de Agua (Federal Water Management Act-WHB) en la versión publicada en la Federal Law Gazette, 12 Noviembre 1996 (B631-1,9. 1695 (1996) y enmendada por el Art. 3 del Acta el 27 de diciembre de 2000 (B6B1.1, p2048 (2000)).

El organismo normativo alemán DVGW ha elaborado, entre otras, las siguientes normas:

- DVGW W110 (M) Geophysical investigation of boreholes and wells used for extraction of groundwater.

Summary of methods.

- DVGW W111 (A) Planning, execution and analysis of pumping test in water extraction wells.
- DVGW W115 (A) Boreholes for exploration, extraction and monitoring of groundwater.
- DVGW W120 (A) Qualification criteria for companies performing drilling and rehabilitation of water wells.
- DVGW W121 (M) Construction and design of groundwater observation wells.

- DVGW W123 Construction and design of Vertical Filter Wells.
- DVGW W135 (A) Regeneration and well decommissioning of boreholes, groundwater monitoring points and wells.

Todas estas normas son de pago y salvo la 123, están disponibles únicamente en alemán.

Estas normas tienen la consideración de “códigos de buenas prácticas” pero son consideradas como los mínimos admisibles por las distintas administraciones.

Italia

Normas estatales:

- “Regio Decreto 11 dicembre 1933, n.1775: Approvazione del testo unico delle disposizioni di legge sulle acqua e sugli impianti elettrici”.
- “D. Lgs 12 luglio 1993, n. 275: Riordino in materia di acque pubbliche”.
- “L. 36/94: Disposizioni in materia de risorse idriche (legge “Galli”)”.
- “D. Lgs 152/99. Conferenza Permanente per i rapporti tra lo Stato e le Regioni e le Province Autonome-Accordo 12 dicembre 2002: linea guida per la tutela della qualità delle acque destinate al consumo umano e criteri generali per l’individuazione delle aree di salvaguardia delle risorse idriche di cui all’art. 21 del decreto legislativo 11 maggio 1999”.
- “D.P.R.M. 128/59: Norme di polizia delle miniere e delle cave” (articolo 67: “giornale di sonda” y art. 70 “ultimazione delle perforazione”.

Aparte de esta regulación nacional existen multitud de normativas de ámbito regional y comunal que también pueden imponer normas de construcción de pozos. Como ejemplo: “Delibero Giunta Provinciale (alto Adegio) n° 2320, 30.06.2008: linee Guide Technique per la costruzione, l’esercizio e la manutenzione di pozzi verticali e orizzontali e la poza in opera di perforazioni” o la “legge regionale 9 dicembre 2000 n° 61” y el “Regolamento regionale 29 luglio 2003 n.10/R” de la región de Piamonte.

Actualmente algunos planes hidrológicos (“Piano Tutela d’Acqua”) incluyen de manera muy específica criterios técnicos de ejecución de sondeos p.e. el de la cuenca del Tevere.

Desde el año 2011 el Comitato tecnico italiano está elaborando la Norma “Pozzi per acqua: Progettazione e Construzione” que ya ha culminado todo el proceso y está pendiente de publicación.

Anexo II. Cualificación requerida para las empresas y el personal dedicado a la construcción de sondeos

En el ámbito nacional

A la vista de los daños ocasionados por la incorrecta ejecución de sondeos en el medio natural y para preservarlo, además de para prevenir los accidentes que sobrevienen del abandono de obras abiertas y sin la debida protección, es exigible la profesionalidad de empresas y del personal encargado de la construcción de sondeos. Estos profesionales son responsables directos de la correcta ejecución, conforme a proyecto, de cuantas acciones se acometan, para lo que han de estar debidamente instruidos, bien tras cursar estudios oficiales con titulaciones, acreditaciones o certificaciones, o de forma profesional por ser este su medio de subsistencia.

Para este último caso, se pone al alcance de todos los profesionales, que dedican su vida a trabajos de perforación y no tienen estudios reglados en estas materias, varias maneras de constatar de forma oficial las capacidades adquiridas a lo largo de su dedicación a estos trabajos. Estar en posesión de la pertinente acreditación oficial es la mejor garantía de conocimiento, facultad y profesionalidad.

La Ley Orgánica 5/2002, de 19 de junio, de las Cualificaciones y de la Formación Profesional, establece en el artículo 10.1 que la Administración General del Estado, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 149.1.30º y 7º de la Constitución y previa consulta al Consejo General de la Formación Profesional, determinará los títulos y los certificados de profesionalidad, que constituirán las ofertas de formación profesional referidas al Catálogo Nacional de Cualificaciones Profesionales.

La Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación, dispone en el artículo 39.6 que el Gobierno, previa consulta a las Comunidades Autónomas, establecerá las titulaciones correspondientes a los estudios de formación profesional, así como los aspectos básicos del currículo de cada una de ellas, perteneciendo a las Comunidades Autónomas el desarrollo del currículo correspondiente a las mismas.

Por otro lado, el BOE nº 205, de 25 de agosto de 2009, recoge el Real Decreto 1224/2009, de 17 de julio, de reconocimiento de las competencias profesionales adquiridas por experiencia laboral, que dispone sobre el objeto, el concepto y la finalidad del procedimiento para la evaluación y acreditación de las competencias profesionales adquiridas a través de la experiencia laboral o de vías no formales de formación.

Este Real Decreto contempla la posibilidad de obtención de titulaciones oficiales de formación profesional y certificados de profesionalidad conforme al Catálogo Nacional de Cualificaciones Profesionales, tras la justificación de la experiencia laboral y la superación de pruebas específicas.

Según las Disposiciones Generales descritas en el BOE nº 301 de fecha jueves 15 de diciembre de 2011, sección I, página 137184, mediante el Real Decreto 1592/2011, de 4 de noviembre, se establece el Título de Técnico en Excavaciones y Sondeos y se fijan sus enseñanzas mínimas. Estas se organizan en forma de ciclo formativo de grado medio, de 2.000 horas de duración, y están constituidas por los objetivos generales y los módulos profesionales del ciclo formativo.

Al margen de que lo deseable sería que todos los profesionales dedicados a labores de perforación estuviesen en posesión de esta titulación de grado medio, existe un proceso mediante el cual puede conseguirse una acreditación oficial de aptitudes profesionales.

Esta acreditación profesional debe determinar el mínimo requerimiento para poder ejercer la profesión de sondista. De esta manera, el personal dedicado a este tipo de trabajos que carece de titulación oficial alguna, podría estar reconocido oficialmente como responsable y cualificado para el desarrollo de estas competencias.

El Real Decreto 1224/2009, de 17 de julio, de reconocimiento de las competencias profesionales adquiridas por experiencia laboral, determina el procedimiento único, tanto para el ámbito educativo como para el laboral, para la evaluación y acreditación de las competencias profesionales adquiridas a través de la experiencia laboral o de vías no formales de formación, del que trata el artículo 8.2 de la Ley Orgánica 5/2002 de 19 de junio, de las Cualificaciones y de la Formación Profesional. Este Real Decreto conlleva la realización de convocatorias por las Administraciones competentes para evaluar y en su caso, acreditar la competencia profesional de los candidatos que deseen verla reconocida.

Mediante documentación que justifique su profesionalidad o dedicación a la realización de determinados trabajos, las personas que quieran participar en estas convocatorias, pueden llegar a acreditar unidades de competencia, que forman parte de una Certificación de Profesionalidad o una titulación de Formación Profesional, a elección del interesado. Al finalizar el procedimiento, una comisión de evaluación determinará el resto de formación necesaria que habrá de cursar el participante, si así lo deseara, para la obtención de la titulación o certificación.

Estas unidades de competencia, que pueden avalar la profesionalidad de los sondistas, se encuentran en el Catálogo Nacional de Cualificaciones Profesionales, que comprende las cualificaciones profesionales más significativas del sistema productivo español, organizadas en familias profesionales y niveles. Cada cualificación está formada por un bloque coherente de unidades de competencia, optando el interesado a ser evaluado en las que consigne en su solicitud.

En el caso concreto de los sondistas, han de escoger la familia profesional: industrias extractivas y en las Cualificaciones de nivel 1, 2 y 3, escoger la de Nivel 2, donde pueden elegir entre 12 cualificaciones o todas ellas.

Del mismo modo que los sondistas han de estar cualificados, las empresas más competentes serán las que, en un ejercicio de responsabilidad, contraten exclusivamente a personal de experiencia acreditada oficialmente o que favorezcan e insten a su personal a la obtención de la acreditación, certificación o titulación oficial que les pudiera corresponder, dato éste que, junto con otros, contribuirá a ponerlas en valor a la hora de ofertarse. Además de ésta, la mejor manera de publicitarse es haciendo gala del cumplimiento de estándares, normas o certificaciones. A nivel empresarial, el hecho de trabajar en cumplimiento de estas normas o estándares, garantiza a contratantes y administraciones la correcta ejecución de las obras de perforación, los cuidados con el medioambiente o la seguridad e higiene en el trabajo.

Someter la empresa a certificaciones (OHSAS, ISO, etc.) es voluntario y proporciona una serie de directrices, especificaciones y requisitos para guiar a las empresas en su implementación. De la misma manera, se puede trabajar bajo los estándares sin necesidad de acreditarlos, pero al no estar reconocidos oficialmente no pueden garantizarse. Estas normas están desarrolladas por un comité de expertos, basándose en necesidades y experiencias de empresas y usuarios, y son aprobadas por más de 150 países.

Dentro del campo que nos ocupa, los estándares que deben cumplir las empresas son los relativos a:

- Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo: Acredita que la empresa ha desarrollado estrategias en materia de seguridad e higiene laboral para sus trabajadores.
- Gestión Energética y Ambiental: Asegura un uso eficiente de la energía, así como la reducción de contaminantes para el Medioambiente.
- Gestión de Riesgos: Se demuestra que se promueven técnicas eficaces para la identificación y control de riesgos.
- Gestión de la Calidad: El más común y de los más valorados, por el que se garantiza la calidad y la mejora constante en productos y servicios ofrecidos.

En el ámbito internacional

En la mayoría de los países, la cualificación necesaria del personal dedicado a la construcción de sondeos se obtiene mediante la aprobación sucesiva de un examen teórico y uno práctico, y es requisito imprescindible para ejercer la profesión. Para acceder a este examen hay que demostrar experiencia en una categoría inferior certificada por un profesional de cualificación superior. Dicha experiencia necesaria puede variar entre las 600 y 5.600 horas según las categorías y los países. La denominación de las categorías profesionales es muy variada según los países. Se analizan a continuación algunas de estas categorías.

Australia

Es posiblemente el sistema de cualificación más completo y lógico, pues se estructura según los tipos de acuíferos y sistemas de perforación.

Tipos de acuíferos			Conocimientos específicos
CERTIFICACIONES	Clase 1	acuíferos únicos, libres o subartesianos (no surgentes)	Conocimiento de la legislación aplicable, características del emplazamiento, comprobación de la verticalidad, elección del sistema de perforación en función de las litologías y características hidrogeológicas, toma de muestras y descripción de las mismas, diseño del pozo (adaptado al tipo de acuífero), cementación y sellado sanitario, localización y diseño del ranurado y del empaque de grava, desarrollo del pozo, ensayo de bombeo y abandono de pozos
	Clase 2	añadida a la clase 1 permite operar en acuíferos múltiples (multicapa) subartesianos	
	Clase 3(*)	añadida a las clases 1 y 2 permite operar en acuíferos artesianos (surgentes)	

(*) Existen dos subclases: clases 3 restringida y clase 3 sin restricciones que permite operar en la Gran Cuenca artesisiana, con agua a alta presión y con frecuencia altas temperaturas

Sistemas de perforación		
Tipos		Subtipos
AUTORIZACIONES	Percusión con cable	
	Sistemas helicoidales	
	Sistemas a rotación con aire o espumas como fluido de perforación (incluida la rotopercusión)	Circulación directa Circulación inversa
	Sistemas a rotación con agua o con agua como base de los lodos de perforación	Circulación directa Circulación inversa
	Sin sistema de perforación	Excavaciones manuales A presión Barrenas
	Perforación sónica	

Las certificaciones de cualificación son legalmente necesarias para poder realizar obras de captación. El contratista solo puede realizar obras en los acuíferos para los que está cualificado y por aquellos métodos de perforación para los que está certificado.

La renovación de las licencias o certificaciones precisa la aportación de documentación justificativa de un mínimo de horas de formación continuada.

Estados Unidos

National Ground Water Association

En Estados Unidos, la National Ground Water Association (NGWA) dispone de un programa de certificaciones (Voluntary Certification Exam) y de programas de formación continuada. Quince estados utilizan o convalidan dichas certificaciones, aunque suelen exigir requisitos específicos en cuanto a pago de derechos, experiencia exigible, agrupación de certificaciones, etc. Estos estados son: Alabama, Arizona, Colorado, Georgia, Maine, Massachusetts, Mississippi, Montana, New Jersey, New York, Rhode island, Tennessee, Vermont, Virginia, West Virginia.

Los certificados de la NGWA se dividen en dos grupos, para sondistas y para instaladores de bombas, que a su vez se diferencian en categorías.

Grupos de certificados	Categorías
Certified Well Driller (CWD)	Exam General
	Exam A/B Cable tool drilling
	Exam C/D Air rotary
	Exam E/F Mud rotary
	Exam G Inverse circulation
	Exam H Jetting and driving wells
	Exam N (ESPECIAL) Well servicing and maintenance
	Exam M Augering and monitoring
Certified Pump Installer (CPI)	Exam K < 100 gpm
	Exam L > 100 gpm

Para obtener el título de sondista es preciso superar el examen general y por lo menos uno de los demás. Para poder acceder al examen se requiere justificar un mínimo de experiencia a las órdenes de un sondista certificado.

Los poseedores de todas las certificaciones pueden acceder a la categoría de Máster. Si no disponen de todas, pero pueden demostrar un mínimo de cinco años de experiencia bajo la dirección de un máster, pueden acceder al examen especial.

Como puede observarse las certificaciones de la NGWA se refieren a sistemas de perforación. En muchos estados se añade a esto el tipo de sondeo en función de su uso y en otros además se separa la categoría de sondista ("journaldrillerman" o simplemente "driller") de la de contratista o empresario ("contractor"); para esta última actividad se suele exigir un seguro que oscila entre los 2 y 5.000.000 \$.

A continuación, se indican algunos ejemplos de distintos estados con las categorías en función del tipo de sondeo. En todos ellos hay que pasar un examen escrito y práctico para cada categoría.

Estado	categorías de licencias	Observaciones
CAROLINA DEL NORTE	A	La categoría A exige los conocimientos de todas las categorías inferiores y así sucesivamente. La categoría A sería el equivalente al "Masterdriller" de otros estados.
	B	
	C	Las licencias se renuevan anualmente y se exige al menos 6 horas de formación continuada anual.
	D	
TEXAS	A Water Wells. Pozos para agua (públicos o privados)	Las licencias hay que renovarlas anualmente y se exige un mínimo de 4 horas de formación continuada anual.
	B Monitoring Wells. Pozos de observación o piezómetros	El sondista que tiene competencias en todas puede acceder al certificado de Master Driller (con una experiencia mínima de cuatro años que pueden rebajarse a uno si tiene el título adecuado de formación profesional.
	C Injection Wells. Pozos de inyección	
	D Dewatering Wells. Pozos de achique	
	E Closed loop Geothermal Wells. Pozos de geotermia de circuito cerrado	

Estado	categorías de licencias	Observaciones
PENSILVANIA	Pozos para agua potable (privado o público).	Si se dispone de todas las certificaciones o se supera un examen específico (con un mínimo de dos años de experiencia como "journaldrillerman" se obtiene la categoría de "master driller".
	Pozos para riego	
	Pozos de observación	
	Pozos de geotermia (de circuito cerrado o abierto).	
	Pozos industriales	
MINNESOTA	Dewatering well	La categoría de "full well contractor" sería equivalente a la "master driller" ya que engloba todas las demás actividades
	Dug well and drive-point well	
	Elevator borehole	
	Explorer responsible individual	
	Vertical heat exchanger (en sistema abierto o cerrado)	
	Monitoring well	
	Well screen and pitless adapter	
	Pump contractor	
	Well sealing	
	Full well contractor	
CALIFORNIA	Certificado profesional C-57 Well Drillers	Hay que superar un "state exam" justificando un mínimo de 3600 horas de trabajo efectivo en sondeos a las órdenes de un sondista certificado. El examen consta de un examen sobre legislación, común a todas las certificaciones profesionales, y examen específico que consta de 6 secciones: 1- Planning and estimating (28 %); 2- Well drilling and development (31 %) 3- Monitoring wells (5 %) 4- Well destruction (6 %) 5- Well maintenance and repair (7 %) 6- Safety (23 %)

Canadá

La Canadian Ground Water Association expide certificados de "Ground Water Drilling Technician" (GWDT) solamente a socios. Para poder obtener dicho certificado hay que tener un mínimo de 2 años o 4.000 horas de actividad de perforación a las órdenes de un profesional certificado y superar un examen.

Dicho examen consta de 150 preguntas, de las que hay que contestar como mínimo un 70 %, agrupadas en secciones:

Secciones	Temario	Número de preguntas
Sec. A	Ground Water Hydrogeology/Geology	50
Sec. B	Drilling Systems	Cable tool 20
		Rotary air/mud; air hammer; reverse circulation 30
Sec. C	Well construction, Development and Maintenance	35
Sec. D	Safety	15

En todo Canadá es obligatorio disponer de la correspondiente certificación para poder realizar los trabajos correspondientes.

En algunos territorios o provincias se acepta la certificación de la CGWA y en otros se realizan exámenes específicos o se exige la superación de cursos de formación profesional en escuelas “Colleges” especializadas, como por ejemplo en British Columbia, Alberta y Ontario.

Territorio		Procedimiento		
British Columbia	Es necesario tener tres años de experiencia, a tiempo completo, y el certificado de “Ground Water Drilling Technician” de la CGWA o el certificado de cualificación como “Water Well Driller” de la Provincia de British Columbia a través de un examen de la Industry Training Authority. Existe un censo oficial del Red Deer College “Water Well Drilling Program”			
Alberta	Es obligatorio tener certificado de “Drill Water Wells”. Para acceder a la certificación es necesario justificar 5.400 horas o 36 meses de experiencia	Clase A	Clase B	Clase C
		Perforaciones para la derivación y uso de aguas para cualquier propósito	Perforaciones poco profundas de gran diámetro y excavadas	Perforaciones para recopilación de datos o investigación, sin derivación de aguas
		La certificación se realiza a través del aprendizaje y la capacitación industrial en el Alberta Advanced Education and Technology	No necesita capacitación formal, pero el contratista debe seguir todas las normas establecidas en el Reglamento	Exentos de las secciones de la regulación que tratan de los requisitos de informes, las especificaciones del pozo y las pruebas de rendimiento
Una vez obtenida la certificación se está obligado a seguir los estándares técnicos establecidos por la Regulación, llevar un registro durante la perforación y presentar un informe de cada sondeo a la administración.				
Ontario	Well Contractor Licence. Licencia para actuar como empresa. No autoriza por sí sola a realizar trabajos de perforación. Hay que tener contratado a personal cualificado			
	Well Technician Licence. Certifica como técnico en sondeos	Clase 1: Perforación de pozos (rotación, percusión por cable, “diamond drilling”). Construcción y abandono de pozos		
		Clase 2: Excavación y perforación de pozos sin maquinaria de perforación. Construcción y abandono de pozos		
		Clase 3: Otras técnicas de perforación, a especificar		
		Clase 4: Instalación de equipos de bombeo		
		Clase 5: Muestreo y ensayos		

Francia

Los certificados profesionales, tanto para empresas como para sondistas, los expide el Sindicato Profesional de Perforadores de pozos de agua y sólo a sus miembros. Tienen validez de 1 año. Para empresas existen las siguientes opciones:

Certificados para empresas	opción 1	Sondeo a percusión		
	opción 2	Pozos de drenaje y a hinca		
	opción 3	Rotopercusión	3.1 < 200 m y < de 10”	
			3.2 > 200 m y < de 10”	
			3.3 < 200 m y > de 10”	
			3.4 > 200 m y > de 10”	
	opción 4	Rotación	4.1 < 200 m y < de 12” 1/4	
			4.2 > 200 m y < de 12” 1/4	
			4.3 < 200 m y > de 12” 1/4	
			4.4 > 200 m y > de 12” 1/4	

Certificados para empresas	opción 5	Rehabilitación de sondeos	5.1 < 200 m
			5.2 > 200 m
	opción 6	Mantenimiento de sondeos	
	opción 7	Clausura de sondeos	
	opción 8	Sondeos geotérmicos-sonda vertical de circuito cerrado	

Categorías	Exámenes
Chef Foreur d'eau "Jefe perforador"	1. Examen escrito tipo test 2. Certificación ("carnet de competences") firmado por el tutor designado por la empresa
Foreur d'eau "Perforador de agua"	3. Presentación y defensa de un informe delante de un jurado compuesto por cuatro miembros (dos representantes de la empresa y dos representantes de los asalariados) pertenecientes a empresas diferentes de la del candidato

Anexo III. Parte de bombeo

Cliente D. _____

Nº: _____

E- _____

Hoja: _____

Sondeo:	Término Municipal:	Provincia:
---------	--------------------	------------

Comienza:	Termina:
Día: Hora: NE: m.	Día: Hora: NE: m.

Electrobomba	Medidas	Perforación, profundidad total:	m.
Marca:	Profundidad de aspiración m.	De: mm ø	m. Entubado
Tipo:	Caudal medido con:	De: mm ø	m. Entubado
Tensión: V.	Niveles medidos con:	De: mm ø	m. Entubado
Potencia: C.V.	Tubería de impulsión:	De: mm ø	m. Entubado

DIRECCIÓN TÉCNICA	Temperatura del agua °C		RESUMEN DE LOS TRABAJOS	
Técnico responsable:	1 H		Horas de bombeo	
	2 H			
	4 H			
Empresa:	8 H		Horas de recuperación	
	12 H			
	FINAL		Horas de parada	

TIEMPO DE BOMBEO		TIEMPO DE RECUPERACIÓN	
ESCALÓN	HORAS	ESCALÓN	HORAS
1°		1°	
2°		2°	
3°		3°	
4°		4°	
5°		5°	
6°		6°	
OTROS		OTROS	
TOTAL		TOTAL	

OBSERVACIONES:

INCIDENCIAS - HORAS DE PARO:

Horas	1º Escalón				2º Escalón				3º Escalón				Recuperación				Continuación del Escalón				Horas	
	Fecha:		Hora:		Fecha:		Hora:		Fecha:		Hora:		Fecha:		Hora:		Fecha:		Hora:			
	T.	Q l/s	N.D.m.	Δδ	T.	Q l/s	N.D.m.	Δδ	T.	Q l/s	N.D.m.	Δδ	T.	Q l/s	N.D.m.	Δδ	T.	Q l/s	N.D.m.	Δδ		
0	0'				0'				0'				0'				780'				13	
	1'				1'				1'				1'				840'				15	
	2'				2'				2'				2'				900'					
	3'				3'				3'				3'				960'					
	4'				4'				4'				4'				1020'					
	5'				5'				5'				5'				1080'					
	6'				6'				6'				6'				1140'					
	7'				7'				7'				7'				1200'				20	
	8'				8'				8'				8'				1260'				25	
	9'				9'				9'				9'				1320'					
	10'				10'				10'				10'				1380'					
	11'				11'				11'				11'				1440'					
	12'				12'				12'				12'				1500'					
	13'				13'				13'				13'				1560'					30
	14'				14'				14'				14'				1620'					
	15'				15'				15'				15'				1680'					
	20'				20'				20'				20'				1740'					
	25'				25'				25'				25'				1800'					
	30'				30'				30'				30'				1860'				35	
	40'				40'				40'				40'				1920'					
	50'				50'				50'				50'				1980'					
1	60'				60'				60'				60'				2040'					
	75'				75'				75'				75'				2100'					40
	90'				90'				90'				90'				2160'					
	105'				105'				105'				105'				2220'					
2	120'				120'				120'				120'				2280'				45	
	150'				150'				150'				150'				2340'					
3	180'				180'				180'				180'				2400'				40	
	210'				210'				210'				210'				2460'					
4	240'				240'				240'				240'				2520'				45	
	300'				300'				300'				300'				2580'					
6	360'				360'				360'				360'				2640'				45	
	420'				420'				420'				420'				2700'					
8	480'				480'				480'				480'				2760'				45	
	540'				540'				540'				540'				2820'					
10	600'				600'				600'				600'				2880'				50	
	660'				660'				660'				660'				2940'					
12	720'				720'				720'				720'				3000'				50	

[illegible]



La presente guía desarrolla las técnicas y recomendaciones que complementan los criterios mínimos del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RD 849/1986 y RD 665/2023; anexo III, partes A y B) para el diseño y la construcción de pozos de captación de aguas subterráneas. Se persigue así prevenir accidentes, evitar la contaminación de los acuíferos y reponer el Dominio Público Hidráulico. Con esta guía se pretende ayudar a asegurar la calidad, durabilidad y protección ambiental de este tipo de infraestructuras hidráulicas. Su objetivo principal es orientar a propietarios, técnicos y empresas en la aplicación de estándares mínimos que garanticen una explotación eficiente del recurso y eviten que las perforaciones se conviertan en vías de contaminación de los acuíferos. En el documento se describe como planificar la realización de un pozo, se detallan los contenidos del necesario informe hidrogeológico previo a la construcción del pozo, se hacen las recomendaciones de diseño constructivo, se abordan los aspectos legales para su tramitación y los contenidos mínimos de los proyectos de construcción. Se incluye una descripción detallada de los aspectos relacionados con la construcción del pozo: condicionantes a considerar en su ubicación, control de la perforación, testificación y auscultación, entubado, macizos de grava, cementación y productos sellantes, ensayos de bombeo, protección sanitaria y desinfección. Finalmente se describen los contenidos que debe considerar el informe final de construcción de un pozo y se incluyen cuatro anexos sobre normativa internacional, cualificación requerida a empresas y personal para la construcción de pozos, parte de bombeo y ficha de inventario de puntos de agua.