

MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

CAPTACIÓN EN POZOS PROFUNDOS

8



MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

CAPTACIÓN POR MEDIO DE POZOS PROFUNDOS

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

www.conagua.gob.mx

Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento

Captación por Medio de Pozos Profundos

ISBN: 978-607-8246-97-7

D.R. © Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209 Col. Jardines en la Montaña
C.P. 14210, Tlalpan, México, D.F.

Comisión Nacional del Agua
Insurgentes Sur No. 2416 Col. Copilco El Bajo
C.P. 04340, Coyoacán, México, D.F.
Tel. (55) 5174-4000

Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento

Impreso y hecho en México

Distribución gratuita. Prohibida su venta.

Queda prohibido su uso para fines distintos al desarrollo social.

Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material contenido en esta obra,
sin fines de lucro y citando la fuente.

CONTENIDO

| | |
|--|------|
| Presentación | IX |
| Objetivo general | XI |
| Introducción | XIII |
| 1. Conceptos básicos | 1 |
| 1.1. El agua subterránea en el ciclo hidrológico | 1 |
| 1.1.1. Precipitación pluvial | 2 |
| 1.1.2. Evapotranspiración | 2 |
| 1.1.3. Esguerrimiento superficial | 5 |
| 1.1.4. Infiltración | 5 |
| 1.2. Características hidráulicas de las rocas | 7 |
| 1.2.1. Porosidad de las rocas | 7 |
| 1.2.2. Permeabilidad y conductividad hidráulica de las rocas | 9 |
| 1.2.3. Transmisividad de las rocas | 11 |
| 1.2.4. Capacidad de almacenamiento | 11 |
| 1.2.5. Coeficiente de almacenamiento específico | 12 |
| 1.2.6. Resistividad de las rocas en la prospección de agua | 13 |
| 1.3. Comportamiento hidrogeológico de las rocas | 20 |
| 1.3.1. Acuíferos, acuitardos y acuicludos | 21 |
| 1.3.2. Tipos de acuíferos | 21 |
| 1.4. Descripción de los principales acuíferos de México | 23 |
| 1.4.1. Calizas acuíferas del noreste | 23 |
| 1.4.2. Calizas de la península de Yucatán | 25 |
| 1.4.3. Acuíferos riolíticos | 25 |
| 1.4.4. Acuíferos basálticos | 26 |
| 1.4.5. Acuíferos aluviales | 27 |
| 2. Exploración hidrogeológica | 29 |
| 2.1. Reconocimientos hidrogeológicos | 30 |
| 2.1.1. Información básica | 30 |
| 2.1.2. Mapas | 30 |
| 2.1.3. Fotografías aéreas | 32 |
| 2.1.4. Reconocimientos de campo | 33 |
| 2.2. Métodos de exploración geofísica | 34 |
| 2.2.1. Métodos geoelectricos | 35 |
| 2.3. Emplazamiento de pozos | 38 |
| 3. Calidad del agua subterránea | 41 |
| 3.1. Calidad natural | 41 |
| 3.2. Muestreo de agua subterránea | 42 |
| 3.2.1. Muestreo | 42 |

| | |
|--|-----|
| 3.2.2. Representación gráfica de la composición del agua | 44 |
| 3.3. Normas de calidad | 45 |
| 3.4. Hidrogeoquímica | 47 |
| 3.4.1. Origen de los elementos y sustancias disueltas en el agua subterránea | 47 |
| 3.4.2. Otros factores que afectan la composición del agua | 48 |
| 3.5. Contaminación de aguas subterráneas | 50 |
| 3.5.1. Tratamiento natural en el subsuelo | 50 |
| 3.6. La calidad del agua y la salud humana | 53 |
| 3.6.1. Microorganismos patógenos | 54 |
| 3.6.2. Compuestos orgánicos | 55 |
| 3.6.3. Compuestos inorgánicos | 55 |
| 3.6.4. Metales pesados | 55 |
| 3.7. Vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación | 55 |
| 4. Equipos y métodos de perforación | 59 |
| 4.1. Métodos con sistema de percusión | 59 |
| 4.1.1. Pozos punta | 59 |
| 4.1.2. Percusión y chorro | 61 |
| 4.1.3. Perforación por percusión con cable y herramienta | 63 |
| 4.2. Métodos con sistema por rotación | 67 |
| 4.2.1. Barrenos manuales (Hand Auger) | 67 |
| 4.2.2. Perforación con barrena taladro sólida (Solid Fligth Auger) | 69 |
| 4.2.3. Perforación con barrena taladro hueca (Hollow Stem Auger) | 71 |
| 4.2.4. Perforación con rotación y aire | 74 |
| 4.2.5. Perforación rotaria con ademe a percusión | 76 |
| 4.2.6. Perforación rotaria con circulación directa | 79 |
| 4.2.7. Perforación con doble tubería y circulación inversa | 84 |
| 4.3. Fluidos y aditivos de perforación | 86 |
| 4.3.1. Tipos de fluidos | 86 |
| 4.3.2. Impacto de los fluidos de perforación | 87 |
| 4.3.3. Propiedades de los fluidos de perforación | 88 |
| 4.3.4. Funciones de los fluidos de perforación | 90 |
| 4.3.5. Aditivos de perforación | 92 |
| 4.4. Equipo disponible en el mercado nacional | 92 |
| 4.5. Tablas comparativas de los métodos de perforación | 95 |
| 4.5.1. Propósito de las tablas | 95 |
| 4.5.2. Descripción de las tablas | 95 |
| 4.5.3. Interpretación de las tablas | 95 |
| 5. Etapa exploratoria del pozo | 99 |
| 5.1. Perforación exploratoria | 99 |
| 5.2. Pruebas preliminares de productividad | 99 |
| 5.3. Clasificación de muestras | 100 |

| | |
|---|-----|
| 5.4. Análisis granulométrico | 101 |
| 5.5. Registros geofísicos en pozos | 104 |
| 5.5.1. Consideraciones petrofísicas | 104 |
| 5.5.2. Registros geofísicos de aplicación en la hidrogeología | 106 |
| 5.6. Planeación de un levantamiento geoelectrico | 115 |
| 5.6.1. Generalidades | 115 |
| 5.6.2. Planteamiento del problema y recopilación de datos previos | 116 |
| 5.6.3. Elección del método geoelectrico más adecuado | 117 |
| 5.6.4. Programación detallada del trabajo de campo | 118 |
| 5.7. Métodos geoelectricos en obras hidráulicas | 118 |
| 5.7.1. Métodos eléctricos en la construcción de obras hidráulicas | 118 |
| 5.7.2. Cuantificación preliminar de bancos de material | 122 |
| 5.7.3. Modelación geomorfológica y estructural del sitio | 122 |
| 5.7.4. Agresividad del suelo | 122 |
| 5.8. Equipos y accesorios en la exploración geoelectrica | 122 |
| 5.8.1. Parámetros que influyen en la selección de un equipo | 122 |
| 5.8.2. Oferta de mercado | 123 |
| 5.8.3. Accesorios | 123 |
| 6. Diseño de pozos | 125 |
| 6.1. Ademes | 126 |
| 6.1.1. Diámetro del ademe | 126 |
| 6.1.2. Espesor de ademe | 127 |
| 6.1.3. Tipos de materiales del ademe | 128 |
| 6.1.4. Proceso de acoplamiento entre ademes | 131 |
| 6.2. Sección de admisión | 131 |
| 6.2.1. Apertura de la rejilla | 134 |
| 6.2.2. Longitud de la sección de succión | 135 |
| 6.2.3. Tipos de rejillas | 138 |
| 6.3. Filtros | 139 |
| 6.3.1. Diseño de filtros | 140 |
| 6.3.2. Tamaño del grano del filtro | 140 |
| 6.3.3. Espesor del filtro | 141 |
| 6.3.4. Materiales del filtro | 141 |
| 6.4. Estabilizadores | 142 |
| 6.5. Protección sanitaria | 142 |
| 7. Terminación, desarrollo y desinfección de pozos | 145 |
| 7.1. Terminación | 145 |
| 7.1.1. Ademado (entubado) | 145 |
| 7.1.2. Engravado | 145 |
| 7.1.3. Cementación | 146 |

| | |
|--|-----|
| 7.2. Desarrollo | 147 |
| 7.2.1. Objetivos | 147 |
| 7.2.2. Métodos de desarrollo | 148 |
| 7.3. Desinfección de pozos | 153 |
| 8. Pruebas de aforo | 155 |
| 8.1. Generalidades | 155 |
| 8.1.1. General | 156 |
| 8.1.2. Particular | 156 |
| 8.2. Marco teórico | 156 |
| 8.2.1. Acuífero libre | 157 |
| 8.2.2. Acuífero confinado | 158 |
| 8.3. Requisitos para realizar las pruebas de aforo | 160 |
| 8.3.1. Hidrología subterránea | 160 |
| 8.3.2. Recursos económicos | 160 |
| 8.3.3. Operación del equipo | 160 |
| 8.4. Ejecución de las pruebas | 161 |
| 8.4.1. Prueba de aforo a caudal escalonado discontinuo | 161 |
| 8.4.2. Prueba de aforo a caudal escalonado continuo | 162 |
| 8.5. Consideraciones en las pruebas de aforo | 164 |
| 8.5.1. Duración de las pruebas | 164 |
| 8.5.2. Medición del caudal de aforo | 166 |
| 8.5.3. Medición del nivel de agua | 166 |
| 8.6. Curva característica del pozo | 167 |
| 8.6.1. Tipos de acuíferos y curvas características | 167 |
| 8.6.2. Anomalías en las curvas características | 168 |
| 8.7. Recomendaciones | 168 |
| 9. Equipamiento e instrumentación | 173 |
| 9.1. Equipo de bombeo | 173 |
| 9.1.1. Bombas de desplazamiento constante | 173 |
| 9.1.2. Bombas de desplazamiento variable | 174 |
| 9.1.3. Bombas sumergibles | 177 |
| 9.1.4. Bombas de chorro | 179 |
| 9.2. Selección de la bomba | 180 |
| 9.3. Equipo eléctrico | 181 |
| 9.3.1. Subestación eléctrica | 181 |
| 9.3.2. Distribución de fuerza | 184 |
| 9.4. Dispositivos hidrométricos | 187 |
| 9.4.1. Piezómetro con orificio calibrado | 187 |
| 9.4.2. Medidores directos | 187 |
| 9.4.3. Medidores electrónicos | 194 |

| | |
|--|-----|
| 9.5. Dispositivos para observar el nivel del agua | 194 |
| 9.5.1. Sonda eléctrica | 194 |
| 9.5.2. Sonda neumática | 194 |
| 9.5.3. Sonda acústica | 194 |
| 9.6. Eficiencia hidráulica en los pozos | 195 |
| 9.6.1. Factores que controlan la eficiencia hidráulica | 196 |
| 9.6.2. Determinación de la eficiencia hidráulica | 196 |
| 9.7. Eficiencia electromecánica | 197 |
| 9.8. Fenómenos que afectan la eficiencia de los pozos | 197 |
| 9.8.1. Corrosión | 197 |
| 9.8.2. Prevención y control de la corrosión | 198 |
| 9.8.3. Incrustación | 199 |
| 9.8.4. Prevención y control de la incrustación | 200 |
| 10. Rehabilitación de pozos y equipo de bombeo | 203 |
| 10.1. Diagnóstico del pozo | 203 |
| 10.2. Tratamiento de pozos | 204 |
| 10.2.1. Aplicación de ácidos y elementos desincrustantes | 204 |
| 10.2.2. Desazolve del pozo | 204 |
| 10.2.3. Cepillado al ademe del pozo | 205 |
| 10.2.4. Pistoneo del pozo | 205 |
| 10.2.5. Aplicación de aire para sustitución de arena por grava | 205 |
| 10.3. Encamisado de pozos | 206 |
| 10.4. Reparación del equipo electromecánico | 207 |
| 10.4.1. Revisión del equipo de bombeo | 207 |
| 10.4.2. Revisión de columnas y transmisión electromotriz | 207 |
| 10.4.3. Revisión del motor eléctrico | 207 |
| 10.4.4. Revisión del transformador | 208 |
| 10.4.5. Revisión del arrancador | 208 |
| 11. Diseño y construcción de captaciones especiales | 209 |
| 11.1. Galerías filtrantes | 209 |
| 11.1.1. Descripción | 209 |
| 11.1.2. Usos comunes | 210 |
| 11.2. Zanjas | 211 |
| 11.2.1. Descripción | 211 |
| 11.2.2. Usos comunes de las zanjas | 211 |
| 11.3. Pozos radiales | 212 |
| 11.3.1. Elementos del pozo radial | 212 |
| 11.3.2. Consideraciones del pozo radial | 212 |
| 11.3.3. Estudios preliminares en pozos radiales | 214 |
| 11.3.4. Diseño de pozos radiales | 215 |

| | |
|---|---------|
| 11.3.5. Método de construcción de pozos radiales | 216 |
| 11.3.6. Mantenimiento de los pozos radiales | 219 |
| 11.4. Pozos punta | 219 |
| 12. Control y supervisión de obra | 221 |
| 12.1. Aspectos generales | 221 |
| 12.2. Conceptos básicos de control | 221 |
| 12.3. Gráficas y tablas de control y supervisión | 222 |
| 12.4. Gráficas de avance de perforación | 222 |
| 12.5. Formatos de control | 223 |
| 12.6. Registro diario de perforación y bitácora de obra | 223 |
| 13. Especificaciones técnicas para la perforación de pozos | 225 |
| 13.1. Aspectos legales para la perforación de pozos | 225 |
| 13.2. Especificaciones técnicas | 225 |
| 13.3. Equipo de perforación | 226 |
| 13.4. Programa de perforación | 226 |
| 13.4.1. Registros de penetración | 227 |
| 13.4.2. Muestreos | 227 |
| 13.4.3. Registro de perforación | 228 |
| 13.4.4. Terminación de los pozos | 228 |
| 13.5. Pérdidas de fluidos o de circulación | 230 |
| 13.5.1. Pérdida total de fluidos o de circulación en materiales inestables | 230 |
| 13.5.2. Pérdidas parciales del fluido o de circulación en materiales inestables | 231 |
| 13.5.3. Pérdidas totales de fluidos o de circulación en materiales estables | 231 |
| 13.5.4. Pérdidas parciales de fluidos o de circulación en materiales estables | 232 |
| 13.6. Procedimiento de análisis de precios unitarios | 233 |
| Conclusiones | 235 |
| Anexos | |
| A. Aditivos de perforación | 237 |
| B. Tablas comparativas de métodos de perforación | 249 |
| C. Herramientas de corte | 277 |
| Glosario de términos | 281 |
| Bibliografía | 285 |
| Tabla de conversiones de unidades de medida | 289 |
| Ilustraciones | 299 |
| Tablas | 303 |

PRESENTACIÓN

Uno de los grandes desafíos hídricos que enfrentamos a nivel global es dotar de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento a la población, debido, por un lado, al crecimiento demográfico acelerado y por otro, a las dificultades técnicas, cada vez mayores, que conlleva hacerlo.

Contar con estos servicios en el hogar es un factor determinante en la calidad de vida y desarrollo integral de las familias. En México, la población beneficiada ha venido creciendo los últimos años; sin embargo, mientras más nos acercamos a la cobertura universal, la tarea se vuelve más compleja.

Por ello, para responder a las nuevas necesidades hídricas, la administración del Presidente de la República, Enrique Peña Nieto, está impulsando una transformación integral del sector, y como parte fundamental de esta estrategia, el fortalecimiento de los organismos operadores y prestadores de los servicios de agua potable, drenaje y saneamiento.

En este sentido, publicamos este manual: una guía técnica especializada, que contiene los más recientes avances tecnológicos en obras hidráulicas y normas de calidad, con el fin de desarrollar infraestructura más eficiente, segura y sustentable, así como formar recursos humanos más capacitados y preparados.

Estamos seguros de que será de gran apoyo para orientar el quehacer cotidiano de los técnicos, especialistas y tomadores de decisiones, proporcionándoles criterios para generar ciclos virtuosos de gestión, disminuir los costos de operación, impulsar el intercambio de volúmenes de agua de primer uso por tratada en los procesos que así lo permitan, y realizar en general, un mejor aprovechamiento de las aguas superficiales y subterráneas del país, considerando las necesidades de nueva infraestructura y el cuidado y mantenimiento de la existente.

El Gobierno de la República tiene el firme compromiso de sentar las bases de una cultura de la gestión integral del agua. Nuestros retos son grandes, pero más grande debe ser nuestra capacidad transformadora para contribuir desde el sector hídrico a **Mover a México**.

Director General de la Comisión Nacional del Agua



OBJETIVO GENERAL

El *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* (MAPAS) está dirigido a quienes diseñan, construyen, operan y administran los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento del país; busca ser una referencia sobre los criterios, procedimientos, normas, índices, parámetros y casos de éxito que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en su carácter de entidad normativa federal en materia de agua, considera recomendable utilizar, a efecto de homologarlos, para que el desarrollo, operación y administración de los sistemas se encaminen a elevar y mantener la eficiencia y la calidad de los servicios a la población.

Este trabajo favorece y orienta la toma de decisiones por parte de autoridades, profesionales, administradores y técnicos de los organismos operadores de agua de la República Mexicana y la labor de los centros de enseñanza.



INTRODUCCIÓN

Las condiciones climáticas adversas imperantes en vastas regiones de nuestro país hacen que el agua subterránea sea uno de los recursos más importantes de México. En más del 50 por ciento del territorio nacional prevalece el clima desértico y semidesértico. En el subsuelo de estas zonas se alojan las aguas principales que a menudo son las únicas fuentes de abastecimiento de agua.

Allende de la porción árida del país, el agua subterránea es muy importante para atender las necesidades de la población y de desarrollo económico que el país necesita, ya que por su permanencia, su amplia distribución espacial y su menor exposición a la contaminación, es preferentemente captada para el consumo humano y el uso industrial. Además, constituye un valioso auxiliar en las regiones agrícolas sustentadas por fuentes de agua superficial.

Actualmente las fuentes subterráneas sostienen el desarrollo agrícola en la porción árida del país, satisfacen las necesidades de agua de la inmensa mayoría de los núcleos de población y suministran casi el total del agua que requieren los desarrollos industriales.

El pozo de bombeo es la captación que suministra agua a innumerables desarrollos de todo tipo y tamaño, desde los pequeños asentamientos rurales hasta las grandes metrópolis, desde las modestas factorías hasta los grandes parques industriales, desde los huertos domésticos hasta las gigantescas zonas de riego por bombeo. Sin embargo, es una obra que tradicionalmente se ha tratado con descuido, lo que ha tenido consecuencias negativas en su construcción, en la eficiencia de su costo y en su vida útil, así como en la calidad del agua que suministra.

El presente libro ha sido preparado para proporcionar instrucción y servir de guía al personal técnico encargado de la construcción, operación y el mantenimiento de pozos.

El libro está dirigido particularmente a aquellas personas que han tenido poca o ninguna experiencia en el asunto. Los temas se tratan de manera clara y sencilla, a fin de que este libro sea benéfico no solamente al ingeniero o al personal técnicamente preparado, sino también, al personal técnico y administrativo de los organismos operadores y a usuarios en general.

En el contenido del libro se utiliza la terminología convencional. Sin embargo, se ha tratado de emplear un lenguaje sencillo y práctico, sin desarrollos teóricos complicados, de tal manera que su contenido sea accesible a toda persona interesada en el ramo de la perforación, la construcción y el mantenimiento de los pozos de agua.

Aunque el tema central es el pozo de bombeo, con sus métodos constructivos y de mantenimiento, se incluyen también diversos temas que cubren desde los conceptos básicos de la Geohidrología y del comportamiento hidrodinámico del agua en el subsuelo, hasta aquellos dedicados a las captaciones hidráulicas especiales, indicadas para condiciones geohidrológicas peculiares de algunas regiones de nuestro país.

El libro está dividido en catorce capítulos, además de cuatro anexos y adicionalmente cuenta con una relación bibliográfica de todo el material utilizado. Comienza con una breve introducción para abordar el contenido del libro y sus objetivos. El capítulo 1 constituye un resumen de los conceptos básicos necesarios para comprender el comportamiento del agua en el subsuelo. El capítulo 2 expone las técnicas adecuadas y la metodología a seguir para llevar a cabo una exploración hidrogeológica. El capítulo 3 está dedicado a analizar la importancia de la calidad del agua y su efecto en el ser humano, así como las formas de estudiarla adecuadamente. En el capítulo 4 se estudian los diversos métodos de perforación de pozos, proporcionando las ventajas y desventajas de cada uno de ellos, comparándolos, a fin de elegir adecuadamente el método a utilizar; este capítulo se apoya fuertemente en los anexos 2, 3 y 4, en los que se proporciona información adicional acerca de los métodos de perforación, los aditivos y las herramientas de corte empleadas. El capítulo 5 analiza las

técnicas a emplear en la etapa exploratoria de los pozos perforados. En el capítulo 6 se establecen y analizan los aspectos fundamentales para el diseño adecuado de los pozos productores, proporcionando tablas y gráficas para la selección adecuada del material a emplear. Dentro del capítulo 7 se abordan los principales métodos de terminación, limpieza y desinfección de pozos. El capítulo 8 analiza brevemente las pruebas de aforo, realizadas con el fin de conocer sus características hidrodinámicas. El capítulo 9 está dedicado al equipo e instrumentación relacionados con la extracción y comportamiento del agua en el interior de los pozos. El capítulo 10 cubre los aspectos relacionados con la rehabilitación, tanto del equipo de bombeo, como de los pozos. El capítulo 11, dedicado al diseño y construcción de captaciones especiales, establece una breve descripción de las mismas y sus características. El capítulo 12 trata del control y supervisión de obra y el 13 está dedicado a las especificaciones técnicas para la perforación de pozos, los aspectos administrativos, de supervisión y de costos de las captaciones de agua subterránea.

La información textual del libro se complementa con esquemas, tablas y guías matriciales para orientar al usuario en la solución de problemas específicos.



1

CONCEPTOS BÁSICOS

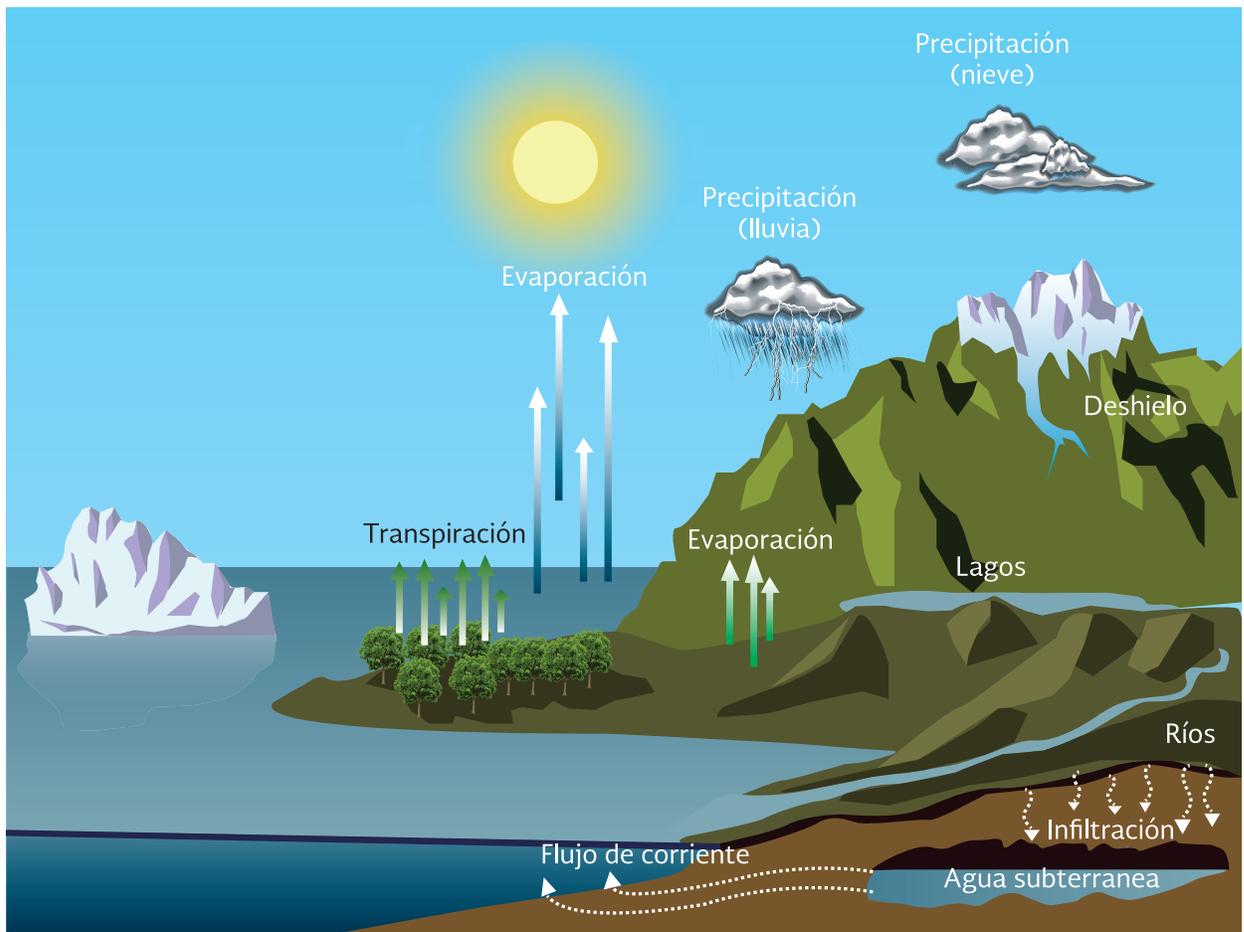
1.1. EL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL CICLO HIDROLÓGICO

El agua subterránea forma parte de un gran sistema circulatorio, el ciclo hidrológico, que comprende prácticamente toda el agua que

en su forma líquida, sólida o gaseosa, se encuentra en movimiento en nuestro planeta (Ilustración 1.1).

A continuación se describen brevemente los fenómenos que integran el ciclo hidrológico y la relación que guardan con el agua subterránea.

Ilustración 1.1 El ciclo hidrológico



1.1.1. PRECIPITACIÓN PLUVIAL

Precipitación es el proceso por medio del cual el vapor de agua se condensa en la atmósfera o sobre la superficie del terreno, dando lugar a la formación de lluvia, nieve, escarcha o rocío. La condensación se produce por enfriamiento de una masa de aire húmedo, cuando es forzada a ascender por su encuentro con un frente frío, por corrientes convectivas causadas por calentamiento de la superficie del terreno o por efectos orográficos (Ilustración 1.2).

Las características de la lluvia y las condiciones del terreno determinan el régimen de escurrimiento de las corrientes superficiales y el ritmo de renovación de las fuentes subterráneas. Hay cierta proporcionalidad directa entre la recarga natural de los acuíferos y el volumen de agua

precipitado sobre la zona considerada. Por ello, la recarga de agua subterránea es más abundante en las regiones lluviosas que en las áridas. La distribución del agua precipitada entre la superficie y el subsuelo es controlada, además, por otros factores: la pendiente topográfica, el tipo de suelo, la cobertura vegetal y la distribución temporal de lluvia (Ilustración 1.3).

1.1.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN

La mayor parte del agua precipitada retorna a la atmósfera en forma de vapor a través de dos procesos: la evaporación y la transpiración. Generalmente, ambos son englobados en el término evapotranspiración debido a que, en la práctica, suele ser muy difícil medirlos y manejarlos cuantitativamente por separado. El volumen de agua que puede evapotranspirarse depende -entre otras cosas- de factores atmosféricos como

Ilustración 1.2 Procesos de precipitación

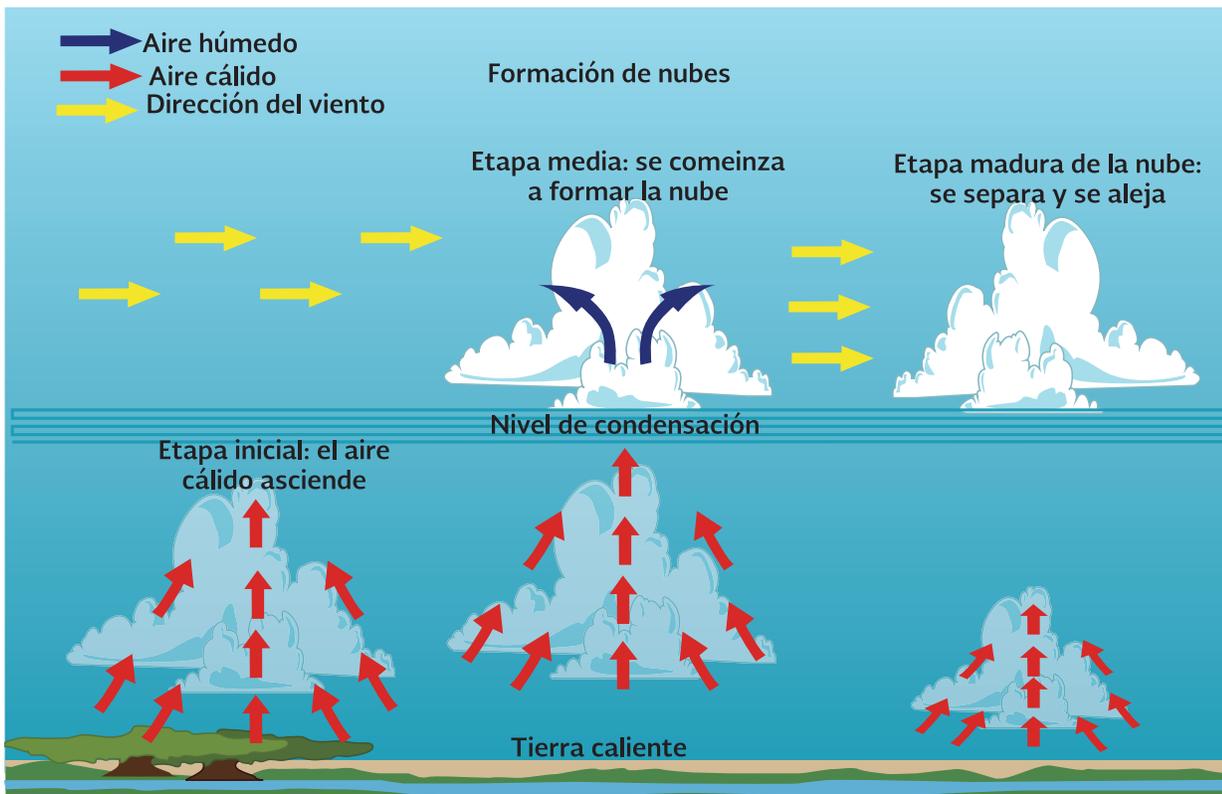
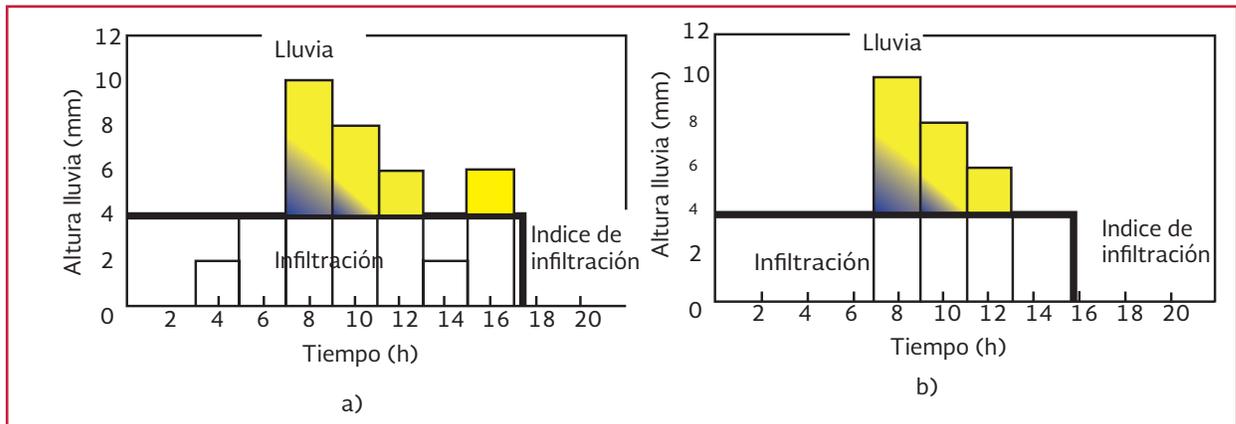


Ilustración 1.3 Hidrogramas a) Lluvia de baja intensidad, b) Lluvia de alta intensidad



la temperatura del aire, la presión barométrica, la velocidad del viento, la humedad ambiental, entre otros, que determinan la capacidad evaporante de la atmósfera. Esta capacidad, denominada evaporación potencial, se valúa a partir de mediciones realizadas en evaporímetros y representa la máxima cantidad de agua que puede retornar a la atmósfera cuando hay suficiente agua disponible para ello en forma permanente, como en los cuerpos de agua superficial.

La evaporación real que tiene lugar en la superficie del terreno depende de la evaporación potencial mencionada anteriormente y además de factores hidrogeológicos como las características del suelo y de los estratos subyacentes y la profundidad a la que se encuentra la superficie freática. Su magnitud depende del contenido de humedad del suelo y de los materiales subyacentes someros, así como de la rapidez con la que el agua puede ascender hasta la superficie. Una vez que el agua retenida en los materiales superficiales se agota, el proceso de evaporación sólo puede continuar si hay agua freática somera. En todo caso, como la permeabilidad de los materiales es mucho menor cuando están parcialmente saturados, el flujo ascendente es muy lento; consecuentemente, la evaporación real suele ser mucho menor que la potencial.

A partir del nivel freático, el agua asciende por capilaridad hasta una altura que depende del tamaño de los poros. La altura capilar alcanza valores hasta de 3 m en materiales finos y es apenas de unos cuantos decímetros en materiales gruesos. Esto significa que el agua subterránea puede evaporarse si se encuentra muy somera y decrece rápidamente conforme aumenta la profundidad del nivel freático. En las depresiones lacustres de las cuencas cerradas, este es el proceso dominante de descarga de los acuíferos.

La mayor parte del agua precipitada es devuelta a la atmósfera por medio de la transpiración de las plantas, cuya magnitud depende del tipo y la densidad de la vegetación. Las plantas llamadas xerófitas (Ilustración 1.4a), típicas de las zonas áridas, se caracterizan por un sistema radicular desarrollado horizontalmente a poca profundidad y por una estructura folicular que reduce la transpiración. Adaptadas para captar la escasa humedad de los estratos someros, no captan agua de la zona saturada. Entre las plantas de este tipo se encuentran las cactáceas como el saguaro, el órgano, el nopal, etc{etera.

Otras plantas denominadas freatofitas (Ilustración 1.4b) tienen sistemas radiculares profundos que se extienden bajo la superficie freática

Ilustración 1.4 a) Plantas xerófitas; b) Plantas freatofitas



y pueden extraer considerables cantidades de agua desde profundidades de unas cuantas decenas de metros. En pozos, en barrancas o en cortes artificiales, se han observado raíces de estas plantas a profundidades de hasta 30 o más metros de la superficie del terreno. A través de este tipo de vegetación tiene lugar la descarga natural de muchos acuíferos.

Entre los dos anteriores se encuentra un tipo intermedio de plantas, las mesófitas, cuyas raíces se extienden hasta profundidades de unos cuantos metros, de tal manera que pueden captar humedad tanto de la zona no saturada, como de la superficie freática.

Las plantas llamadas hidrófilas son aquellas cuyas raíces se desarrollan en un medio acuático,

como las zonas pantanosas o las márgenes de los ríos. A este tipo corresponden el mangle, el ahuehuate, el tule y el sauce. Finalmente, las plantas llamadas halófilas están adaptadas para utilizar agua salobre. De lo anterior se infiere que el tipo y la densidad de la vegetación nativa aportan información valiosa respecto a la presencia, la calidad y la cantidad del agua subterránea.

Generalmente, la cuantificación de la descarga de agua subterránea por evapotranspiración es incierta porque en el proceso intervienen numerosos factores variables en el área y en el tiempo, difíciles de controlar en la práctica a escala regional. Su medición precisa es factible en un sitio y en una condición dada mediante instalaciones complejas y costosas denomina-

das lisímetros, pero los resultados no son extrapolables a un área extensa.

Cuando la superficie freática se encuentra muy somera y la cobertura vegetal es densa y continua, el valor de la evaporación real es equivalente o se aproxima al de la evaporación potencial y, por tanto, puede ser estimado a partir de los datos registrados en evaporímetros. Pero a la escala de una cuenca o de un área extensa, solo puede estimarse utilizando ecuaciones empíricas como por ejemplo la desarrollada por Turc.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{\left(0.9 + \frac{P^2}{L^2}\right)}} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

donde:

$$\begin{aligned} ETR &= \text{Evaporación real en mm/año} \\ P &= \text{Precipitación media anual en mm} \\ L &= 300 + 25 T + 0.05 T^3 \end{aligned}$$

siendo T la temperatura media anual en °C de la cuenca considerada.

1.1.3. ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

Cuando la intensidad de lluvia es mayor que la capacidad de infiltración del terreno, la cantidad excedente fluye superficialmente o se estanca en depresiones. Los principales factores que determinan la magnitud de escurrimiento son la intensidad de la lluvia, la pendiente topográfica y la cobertura vegetal. La vegetación frena la velocidad del escurrimiento, propiciando la infiltración. En las regiones áridas, la escasa vegetación y las lluvias intensas se traducen en escurrimientos torrenciales.

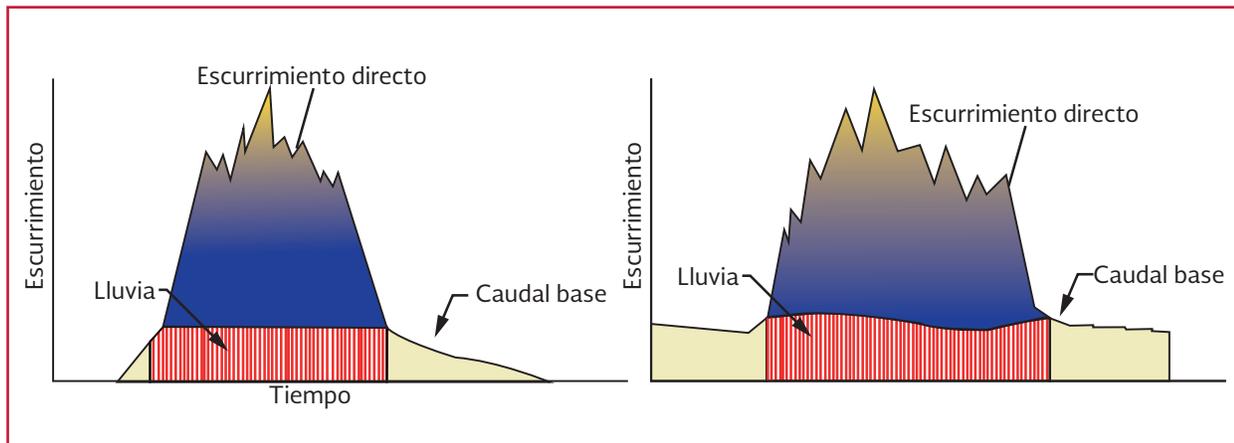
Eventualmente, el agua que escurre sobre el terreno llega a un cauce. Este también puede funcionar como un dren natural del subsuelo, recibiendo parte del agua infiltrada que circula a través de los acuíferos. Por tanto, el escurrimiento de las corrientes tiene dos componentes principales: la contribución superficial, llamada escurrimiento directo, y la aportación subterránea, denominada caudal base. El régimen de escurrimiento de una corriente está representado por medio de su hidrograma, gráfica que muestra la variación de su caudal en una estación hidrométrica dada.

De igual manera se presentan corrientes de régimen intermitente que solo tienen escurrimiento directo o que reciben caudal base durante un cierto tiempo después de terminar la temporada de lluvias. En cambio, las corrientes de régimen permanente tienen descarga durante todo el año. Los métodos hidrológicos permiten separar el hidrograma en sus componentes y analizar el decaimiento del caudal base para deducir la cantidad de agua descargada por los acuíferos, y de sus características en el área tributaria de la corriente, hasta el sitio del aforo. Así, un caudal base elevado refleja abundante renovación y alta permeabilidad del acuífero y un decaimiento lento de ese caudal es indicativo de un almacenamiento subterráneo susceptible de ser descargado a la corriente (Ilustración 1.5).

1.1.4. INFILTRACIÓN

La capacidad de infiltración de un terreno se define como la velocidad máxima con que puede absorber el agua aplicada sobre él. Su valor se mide por medio de cilindros huecos, llamados

Ilustración 1.5 Régimen de escurrimiento superficial



infiltrómetros, que se hincan en el terreno para observar la rapidez con que se infiltra el agua aplicada en su interior. La Ilustración 1.6 muestra algunos tipos de infiltrómetro. Los resultados de estas pruebas solo tienen validez puntual o local y no deben extrapolarse a áreas extensas.

A partir de un valor máximo, la velocidad de infiltración decrece exponencialmente en el tiempo, hasta alcanzar un valor mínimo y estable, que es el correspondiente a la capacidad de infiltración. El decremento es causado por varios procesos: la expansión de materiales finos, la oposición del

aire atrapado al avance del frente de humedad y la compactación de la superficie del terreno por el impacto de las gotas de lluvia.

Con base en los valores de esta propiedad, puede estimarse el volumen de agua que ingresaría al subsuelo en el área donde se realizaron las mediciones si se aplicara agua en forma continua durante ciertos intervalos de tiempo en cantidades tales que se igualara o rebasara la capacidad del terreno para captarla, por ejemplo, a lo largo de un tramo de una corriente de agua (cauce o canal) o en un estanque.

Ilustración 1.6 Infiltrómetros



Infiltrómetro de minidisco para medir la consecutividad hidráulica del suelo

- Permite medir la conductividad hidráulica no saturada del suelo en campo y en laboratorio
- Es posible regular la succión sobre la superficie de contacto en un rango: 0.5 - 6.0 cm



Infiltrómetro doble anillo "Eij KelKamp" para realizar medidas sincronizadas triples de velocidad de infiltración. Equipo completo

El infiltrómetro de doble anillo es un instrumento muy sencillo utilizado para determinar la infiltración de agua en el suelo. Los anillos se hunden parcialmente en el suelo y se llenan de agua, y después se mide la velocidad de infiltración.



Infiltrómetro de tensión "IOWA STATE", diámetro 20 cm, completo.

Los infiltrómetros de tensión están diseñados para medir las propiedades hidráulicas no saturadas de los suelos. El agua se filtra en el suelo a un ritmo que es más lento que cuando el agua está estancada sobre la superficie del suelo.

Los valores de la capacidad de infiltración por sí solos no permiten valorar el volumen de infiltración generado en una cuenca o área extensa, porque ese volumen depende además de otros factores, como la intensidad de lluvia, la topografía y la cobertura vegetal.

Por la misma razón, no es válido estimar la infiltración en un afloramiento geológico como un porcentaje arbitrariamente supuesto de la precipitación. El volumen infiltrado puede evaluarse en estudios preliminares a partir de datos pluviométricos y de escurrimiento superficial. Esto se logra utilizando métodos hidrológicos como el denominado "peinado del histograma" para deducir un índice de infiltración medio, representativo del área analizada.

En todo caso, es importante aclarar que el volumen de agua infiltrado no es necesariamente equivalente a la recarga efectiva de un acuífero, pues con frecuencia una fracción significativa de aquel no llega a la zona saturada. Una parte es retenida en la zona no saturada para satisfacer la deficiencia de humedad, otra puede ser extraída y otra parte puede circular subsuperficialmente a poca profundidad y aflorar sin haberse incorporado a la zona saturada regional.

1.2. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE LAS ROCAS

Las características hidrodinámicas de las rocas son aquellas que determinan las cantidades de agua que pueden almacenar, ceder y transmitir. Dependen a su vez de factores litológicos: granulometría, fracturamiento, grado de cementación o compactación, etc. En el presente libro se presta especial atención a las que controlan el rendimiento de las captaciones de agua.

1.2.1. POROSIDAD DE LAS ROCAS

La porosidad (n) es una medida de la cantidad de vacíos que tiene un material y se define como la relación entre su volumen de vacíos (V_v) y el volumen total (V_t), esto es:

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Se expresa como un porcentaje (Ilustración 1.7).

Como en la zona saturada los huecos están completamente llenos de agua, la porosidad resulta también ser una medida de la cantidad de agua que el material puede contener por unidad de volumen. En los materiales clásicos, los factores controlan la porosidad son: la distribución granulométrica, el grado de compactación y la forma de los granos. En general, cuanto mayor es el tamaño medio del grano tanto menor es la porosidad. Los materiales mal clasificados son menos porosos que los bien clasificados (tamaño de grano más o menos uniforme) porque las partículas chicas llenan los espacios entre las mayores (Ilustración 1.8).

La compactación provoca un acomodo estrecho de los granos, especialmente cuando su forma lo propicia, reduciéndose así el volumen de vacíos. Por consiguiente, la porosidad de los materiales decrece conforme aumenta la profundidad a la que se encuentran debido a la compactación provocada por el peso del material suprayacente.

La porosidad puede clasificarse en primaria y secundaria (Ilustración 1.9). La primera es la resultante de la forma y las condiciones en las que la roca se formó (diagénesis), mientras que la segunda es producto de los rasgos estructurales provocados en ella debido a procesos geológicos y tectónicos.

Ilustración 1.7 Porosidad

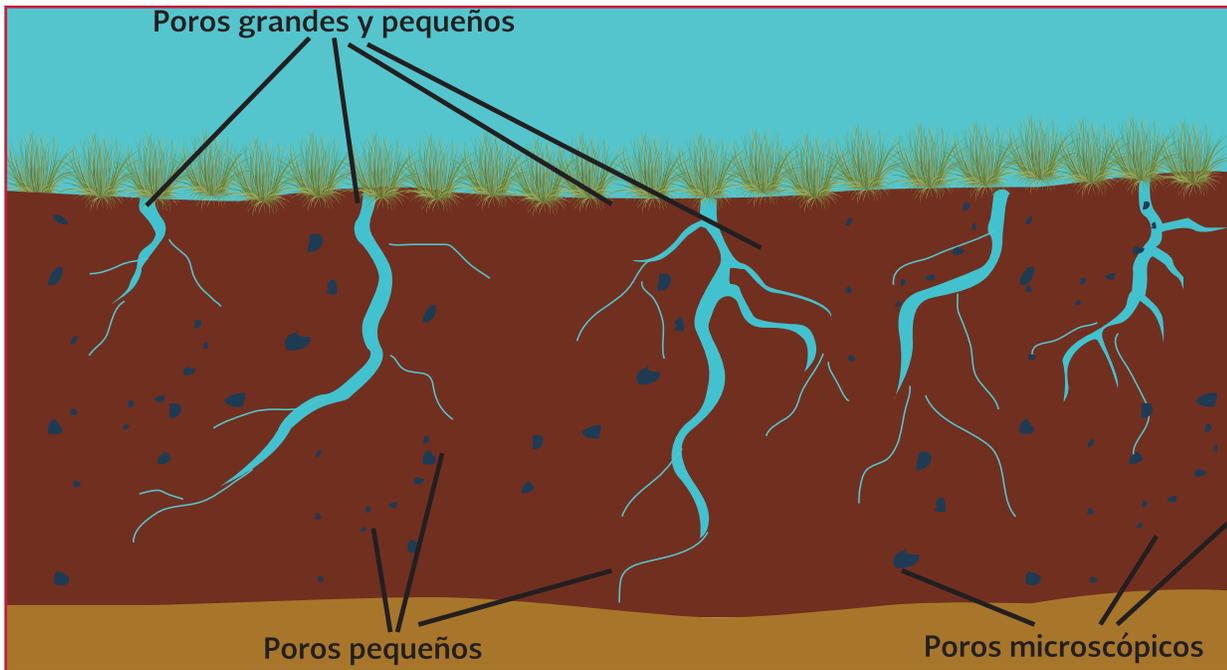


Ilustración 1.8 Influencia de la granulometría sobre la porosidad

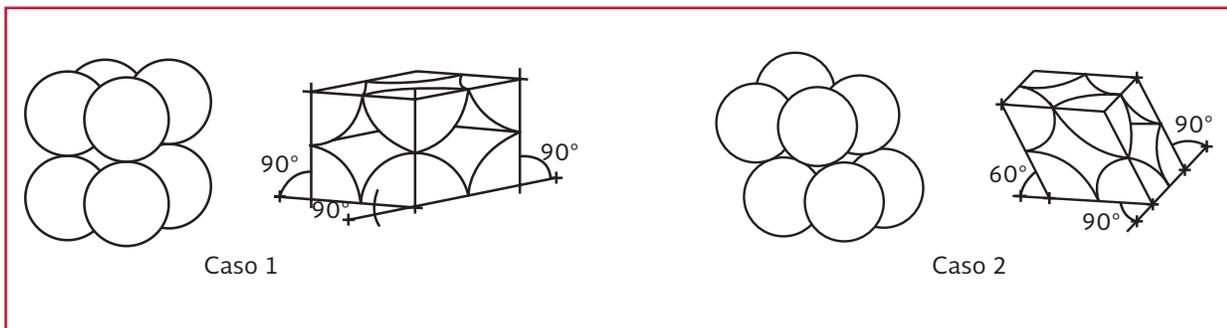
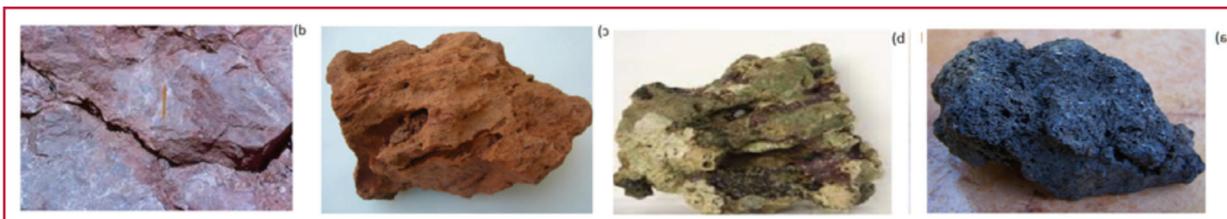


Ilustración 1.9 Tipos de porosidad: Primaria a), b), c); Secundaria d)



El término **doble porosidad**, recientemente difundido, se refiere a materiales cuyas porosidades primaria y secundaria son significativas, características que dan lugar a un comportamiento hidrodinámico peculiar que

influye especialmente en la migración de contaminantes.

En la Tabla 1.1 se consignan los intervalos de valores dentro de los cuales varía la porosidad

de los materiales más comunes. Se puede observar que en los materiales clásticos la porosidad es inversamente proporcional al tamaño de las partículas. Consecuentemente, los materiales finos como los limos y las arcillas, pueden almacenar más agua que los gruesos, lo cual no significa que pueda disponerse de ella fácilmente ya que esto depende, entre otros factores, de la interconexión entre los poros.

Las arenas de grano redondeado tienen una porosidad menor que las arcillas, las cuales están constituidas por partículas laminares de amplia superficie específica que origina la presencia de fuerzas moleculares entre el agua y las partículas de arcilla. Sin embargo, a pesar de su menor porosidad, los materiales arenosos son permeables y buenos acuíferos, mientras que las arcillas dan lugar a acuitados.

1.2.2. PERMEABILIDAD Y CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE LAS ROCAS

La permeabilidad (k) de una roca o suelo es una de las características de mayor interés para el

ingeniero. En particular, en el campo de la hidrogeología es de primordial importancia, pues de ella depende fundamentalmente la velocidad de circulación del agua en el subsuelo. En relación con el tema de este libro, la permeabilidad es uno de los principales factores que controlan el rendimiento de las captaciones de agua.

La permeabilidad depende exclusivamente de las características del medio: tamaño del grano, distribución granulométrica, orientación de las partículas, grado de compactación o cementación, densidad y abertura de las fisuras, tamaño de conductos, etc. Cuanto menor es el tamaño de las partículas, tanto menor es su área de contacto con el agua, incrementando la resistencia al flujo y por tanto, reduciendo la permeabilidad. Debido a esto, los materiales de grano fino, como las arcillas, son poco permeables.

Generalmente, en materiales bien graduados la permeabilidad aumenta con el tamaño de grano. Por ello suele representarse en términos de su tamaño medio T como sigue:

$$k = Cd^2 \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Tabla 1.1 Intervalos de porosidad de materiales

| Materiales | n (por ciento) |
|----------------------------------|-------------------|
| Depósitos no consolidados | |
| Arcilla | 40-70 |
| Limo | 35-50 |
| Arena | 25-50 |
| Grava | 25-40 |
| Rocas | |
| Arenisca | 05-20 |
| Lutita | 05-10 |
| Basalto fracturado | 05-50 |
| Caliza cárstica | 05-50 |
| Dolomía o caliza | 0-20 |
| Rocas cristalinas fracturadas | 0-10 |
| Rocas cristalinas densas | 0-5 |

En donde el coeficiente T , llamado factor de forma, agrupa la influencia de los demás factores. Por lo tanto la permeabilidad intrínseca se define como $C =$ constante adimensional relacionada con la configuración del fluido multiplicado por $d^2 =$ diámetro promedio de los poros del material.

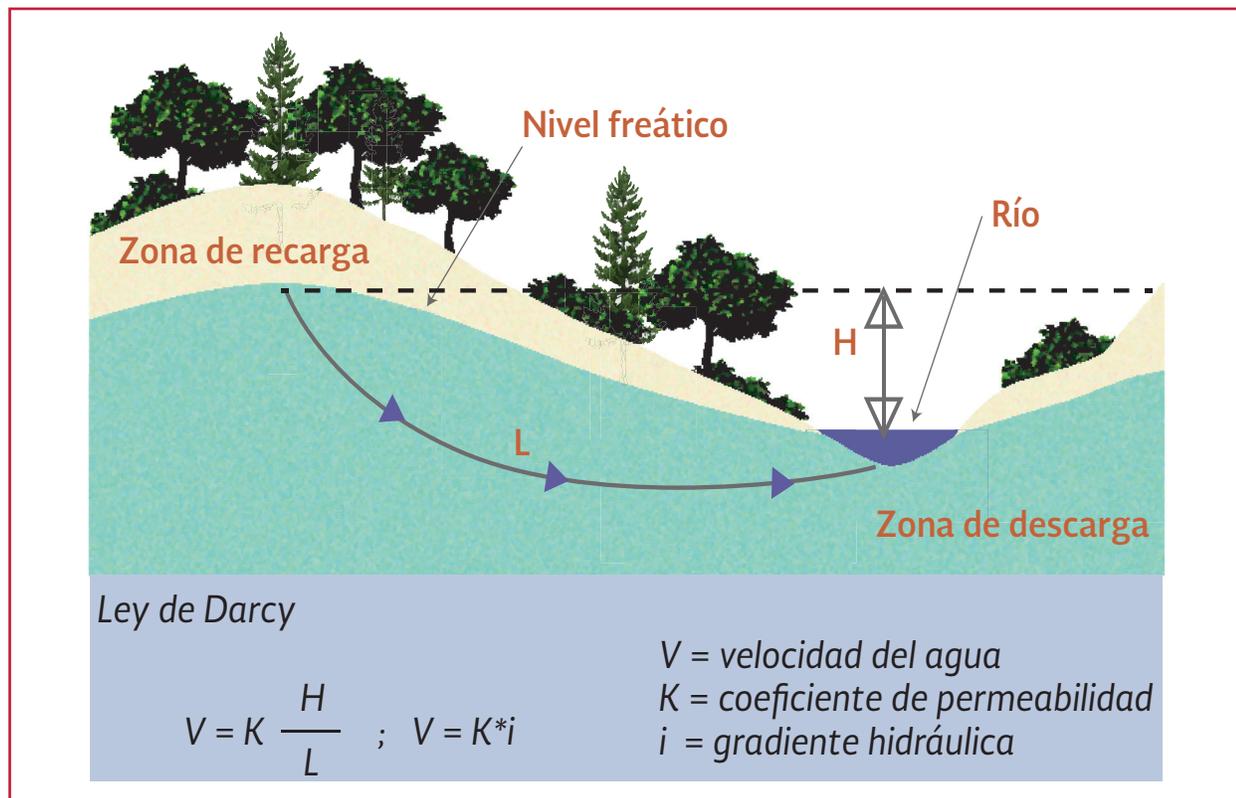
La permeabilidad se mide en unidades de velocidad [longitud/tiempo] o en Darcys, siendo un Darcy igual a 1×10^{-8} cm/s. La permeabilidad de las rocas depende del tamaño de los poros y de la interconexión entre los mismos. Algunas rocas ígneas muy porosas, como los basaltos vesiculares, pueden ser poco permeables si las vesículas o vacuolas no están conectadas. Su valor depende principalmente de la porosidad secundaria: el fracturamiento y la meteorización, que tiende a fragmentar su masa y a ensanchar las

juntas y fisuras, incrementando la permeabilidad. Sin embargo, el meteorismo químico intenso tiene un efecto contrario sobre la permeabilidad, cuando altera la roca hasta convertirla en detritos arcillosos.

Es importante destacar que los materiales finos son poco permeables. A la escala regional de muchos sistemas hidrogeológicos, las formaciones arcillosas suelen constituir acuitardos que transmiten o ceden cuantiosos volúmenes de agua.

La conductividad hidráulica (K) se define como la cantidad de agua que circula a través de una sección de área unitaria normal al sentido de flujo, bajo un gradiente hidráulico unitario. Se expresa en unidades de velocidad: en m/s o en m/día (Ilustración 1.10).

Ilustración 1.10 Conductividad hidráulica



La conductividad hidráulica depende tanto de las propiedades del fluido como de las características del medio. Por lo que K es función del peso específico del fluido, de su viscosidad dinámica, de una longitud característica d , que es el promedio del tamaño de los poros del medio y del factor de forma C , que toma en cuenta los efectos de la estratificación, del empaquetamiento, de la disposición de los granos, de la distribución de tamaños y de la porosidad.

Las variaciones en las propiedades físicas del agua influyen en la conductividad hidráulica. El agua salada circula con mayor velocidad que la dulce, por ser aquella de mayor densidad. El agua caliente fluye más rápido que la fría, por ser de menor viscosidad. La influencia del fluido es mucho más importante en problemas relacionados con la migración de contaminantes densos, como los hidrocarburos pesados que circulan con mayor rapidez que los ligeros.

La Tabla 1.2 muestra los valores medios de K y k para diferentes litologías:

Tabla 1.2 Valores medios de K y k

| Material | K , cm/s | k , Darcys |
|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Grava | $1 - 1 \times 10^2$ | $1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-4}$ |
| Arena limpia | $1 \times 10^{-3} - 1$ | $1 - 1 \times 10^{-2}$ |
| Arenas arcillosas y arenas finas | $1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-3}$ | $1 \times 10^{-3} - 1$ |

1.2.3. TRANSMISIVIDAD DE LAS ROCAS

La capacidad transmisora de un acuífero está representada por su coeficiente de transmisividad T , cuyo valor es calculado como el producto de su conductividad hidráulica y el espesor saturado b , esto es:

$$T = kb \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Esta importante propiedad es definida como la cantidad de agua que pasa a través de una sección vertical de un metro de ancho y altura igual al espesor saturado del acuífero, bajo un gradiente hidráulico unitario; por tanto, se expresa en unidades de longitud al cuadrado sobre el tiempo.

El valor del coeficiente de transmisividad es determinado mediante pruebas de bombeo o estimado a partir de la conductividad hidráulica de los materiales que forman el acuífero. También puede deducirse por medio de la aplicación de trazadores.

La transmisividad es el factor que directamente determina el rendimiento de las captaciones de agua. Conocido su valor, puede calcularse la cantidad de agua que transmite el acuífero a través de una sección de interés o estimarse el probable rendimiento de una captación.

1.2.4. CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO

La capacidad de un acuífero para ceder o almacenar agua depende de sus características y de las condiciones hidráulicas en que se encuentra (libre o confinado). En un punto dado del subsuelo se produce una presión total debida al peso de los materiales sobreyacentes, que se reparte entre el material y el agua contenida en él. La parte de la presión total soportada por el esqueleto sólido se llama presión intergranular o presión efectiva; mientras que la presión soportada por el agua recibe el nombre de presión intersticial o presión de poro, y es proporcional a la carga hidráulica.

En general, la presión total se mantiene prácticamente constante a menos que se modifique artificialmente, por ejemplo, aumentándola con la construcción de una obra o disminuyéndola al realizar una excavación, pero la distribución entre sus dos componentes puede variar con las fluctuaciones del nivel de agua. Cuando el nivel desciende, la presión intersticial disminuye, la presión intergranular aumenta en la misma medida y como consecuencia de ello, las moléculas de agua se expanden y la roca se comprime o compacta. A la inversa, cuando el nivel del agua asciende, la presión intersticial aumenta y la intergranular disminuye en la misma medida; consecuentemente, las moléculas de agua se comprimen y la roca se expande. Debido a estos procesos, la roca cede o toma cierta cantidad de agua, según que el nivel de agua descienda o ascienda, respectivamente.

1.2.5. COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO ESPECÍFICO

Es la cantidad de agua que libera o toma un volumen unitario de material (en condición de confinamiento) cuando el nivel de agua desciende una unidad; se expresa en L/m.

Las moléculas de agua son indeformables, de manera que la cantidad de agua que puede liberar un material confinado depende, principalmente, de la compresibilidad de su esqueleto sólido. Mientras más compresible, libera mayor cantidad de agua. El coeficiente de almacenamiento específico de los materiales finos es mayor que el de los clásticos gruesos y mucho mayor que el de las rocas consolidadas. En el caso extremo, las rocas que son casi incompresibles, solo ceden pequeñas cantidades

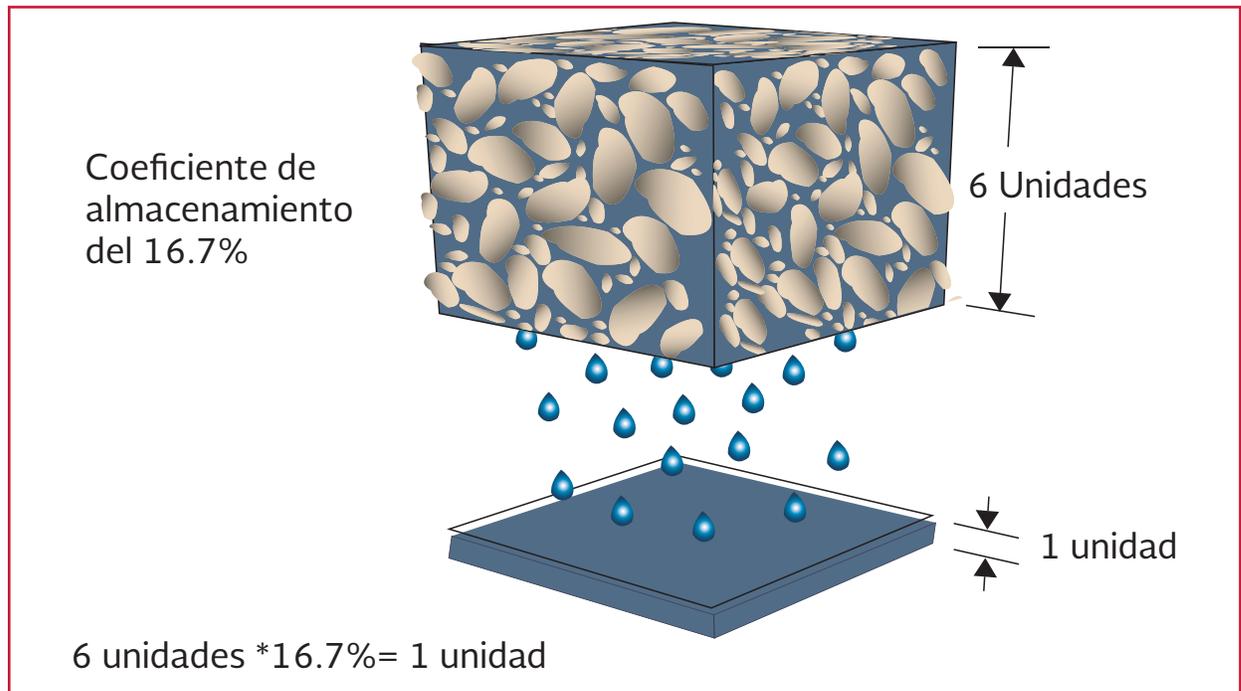
de agua por expansión de las moléculas de la misma.

El concepto anterior es aplicable para definir la capacidad de almacenamiento de un acuífero, por medio del coeficiente de almacenamiento, S , definido como la cantidad de agua que libera o toma una columna de acuífero de sección horizontal unitaria y altura igual a su espesor saturado, cuando la carga hidráulica desciende (o asciende) una unidad. Si el acuífero es confinado, el valor de S es igual al producto de su coeficiente de almacenamiento específico y su espesor saturado; por tanto, se trata de un coeficiente adimensional (Ilustración 1.11).

A pesar de que algunos materiales son compresibles, el volumen de agua que ceden los acuíferos confinados por compactación suele ser pequeño. Por ello, su coeficiente S varía dentro de un intervalo de valores muy reducido: de 1×10^{-2} a 1×10^{-5} . Cuando el acuífero es libre, una cantidad adicional de agua es liberada (o tomada) por vaciado (o llenado) de los poros, cantidad que está representada por el rendimiento específico del material. Como la cantidad liberada por este proceso es mucho mayor que la cedida por la compactación del material y la expansión del agua, se dice que el coeficiente de almacenamiento de los acuíferos libres es prácticamente equivalente a su rendimiento específico, que varía en el intervalo de 5×10^{-2} a 3×10^{-1} .

De lo anterior se infiere que un acuífero libre cede mucha más agua por unidad de abatimiento de la carga hidráulica, que uno confinado compuesto de los mismos materiales y de idénticas dimensiones. La baja capacidad de almacenamiento es una de las principales características desfavorables de los acuíferos confinados.

Ilustración 1.11 Coeficiente de almacenamiento



Por ejemplo, un acuífero libre con coeficiente S de 1×10^{-1} , cederá una cantidad de agua 1000 veces mayor que un acuífero de las mismas dimensiones y litología, pero confinado y con coeficiente de almacenamiento de 1×10^{-4} , para un mismo abatimiento.

1.2.6. RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS EN LA PROSPECCIÓN DE AGUA

1.2.6.1. Resistividad de las rocas

Las propiedades físicas que definen a un material de acuerdo con su comportamiento electromagnético son: la constante dieléctrica, la permeabilidad magnética y la resistividad. La resistividad es la propiedad que se mide en los métodos eléctricos de exploración. La mayoría de las rocas no son buenas conduc-

toras de la corriente eléctrica, son prácticamente aislantes debido a que también lo son los minerales que se encuentran en mayor proporción en ellas, como el cuarzo, los feldespatos, la calcita, etcétera.

La conducción eléctrica se da por dos razones principales. La primera y menos importante desde el punto de vista geohidrológico, es por la presencia de minerales del tipo metálico, como la pirita, la magnetita, la pirrotita, entre otros, que hacen que la roca se comporte como un conductor, cuya conductividad aumentará al incrementarse el contenido de estos minerales y su interconexión.

La segunda causa, la más interesante desde el punto de vista geohidrológico, es la presencia de fluidos en los poros de las rocas, de los cuales el más común es el agua, pudiendo haber también hidrocarburos o gases.

La resistividad eléctrica de las rocas varía en amplios márgenes, por lo que es casi imposible asignar valores específicos a los diversos tipos de roca. No obstante, se pueden estimar criterios de conductividad con base a las tablas siguientes (Tabla 1.3 a Tabla 1.9).

Cuando se estudia una región determinada, se observa que el intervalo de variación para una misma roca no es tan grande, y usualmente se pueden asignar intervalos característicos a los diferentes tipos de roca presentes en la zona de estudio. No obstante, puede incurrirse en un error si se asignan esos mismos intervalos a otras zonas en las que hay un tipo similar de roca.

Por ejemplo, una caliza sana y compacta puede tener resistividades mayores a 5 mil ohm m, mientras que una caliza con alteración a arcilla fisurada

y saturada de agua puede presentar resistividades de solo algunas decenas de ohm m. Lo mismo sucede con los basaltos, que en un estado compacto y sano son usualmente muy resistivos pero cuando contienen fracturas, alteraciones a arcillas y saturación de agua, su resistividad baja considerablemente. Por otro lado, puede decirse que los factores que determinan la resistividad promedio de las rocas se conservan a menudo en toda la unidad de la roca y debido a esto, puede diferenciarse una formación de otra tomando como base las mediciones de la resistividad.

1.2.6.2. Impacto del agua en la resistividad de las rocas

Cuando hay agua rellenando poros, fisuras y fracturas de las rocas, su resistividad global se modifica dependiendo a los siguientes parámetros:

Tabla 1.3 Resistividades de materiales y elementos (Telford, 1976)

| Elemento | Resistividad (ohm-m) | |
|------------------|---|----------------------|
| | Promedio | Intervalo |
| Antimonio | | 4.5×10^{-7} |
| Arsénico | | 2.2×10^{-7} |
| Bismuto | | 1.2×10^{-6} |
| Cobre | | 1.7×10^{-8} |
| Oro | | 2.4×10^{-8} |
| Grafito (carbón) | 5×10^{-7} a 10 | 1×10^{-3} |
| Hierro | | 1×10^{-7} |
| Plomo | | 2.2×10^{-7} |
| Mercurio | | 9.6×10^{-7} |
| Molibdeno | | 5.7×10^{-8} |
| Níquel | | 7.8×10^{-8} |
| Platino | | 1×10^{-7} |
| Plata | | 1.6×10^{-8} |
| Azufre | 1×10^7 a 1×10^{16} | 1×10^{14} |
| Telurio | 1×10^{-4} a 2×10^{-3} | 1×10^{-3} |
| Uranio | | 3×10^{-7} |
| Zinc | | 5.8×10^{-8} |

Tabla 1.4 Resistividades de minerales (Telford, 1976)

| Resistividad (ohm-m) | | | |
|----------------------|---|---|----------------------|
| Mineral | Fórmula | Intervalo | Promedio |
| Argentita | Ag ₂ S | 2x10 ⁻³ a 1x10 ⁴ | 1.7x10 ⁻³ |
| Bismutita | Bi ₂ S ₃ | 18 a 570 | |
| Covalita | CUS | 3x10 ⁻⁷ a 8x10 ⁻⁵ | 2x10 ⁻⁵ |
| Calcocita | Cu ₂ S | 3x10 ⁻⁵ a 0.6 | 1x10 ⁻⁴ |
| Calcopirita | CuFeS ₂ | 1.2x10 ⁻⁵ a 0.3 | 4x10 ⁻³ |
| Bornita | Cu ₅ FeS ₄ | 2.5x10 ⁻⁵ a 0.5 | 3x10 ⁻³ |
| Marcasita | FeS ₂ | 1x10 ⁻³ a 3.5 | 5x10 ⁻² |
| Pirita | FeS ₂ | 2.9x10 ⁻⁵ a 1.5 | 3x10 ⁻¹ |
| Pirrotita | FenSm | 6.5x10 ⁻⁶ a 5x10 ⁻² | 1x10 ⁻⁴ |
| Cinabrio | HgS | | 2x10 ⁻⁷ |
| Galena | PbS | 3x10 ⁻⁵ a 3x10 ² | 2x10 ⁻³ |
| Milerita | NiS | | 3x10 ⁻⁷ |
| Stanita | Cu ₂ FeSn ₂ | 1X10 ⁻³ a 6x10 ³ | |
| Stibinita | Sb ₂ S ₃ | 1X10 ⁵ a 10 ¹² | 5x10 ⁶ |
| Esfalerita | ZnS | 1.5 a 10 ⁷ | 1x10 ² |
| Cobaltita | CoAsS | 3.5x10 ⁻⁴ a 10 ⁻¹ | |
| Smaltita | CoAs ₂ | | 5X10 ⁻⁵ |
| Arsenopirita | FeAsS | 2x10 ⁻⁵ a 15 | 1x10 ⁻⁵ |
| Nicolita | NiAs | 1X10 ⁻⁷ a 2x10 ⁻³ | 2x10 ⁻⁵ |
| Silvanita | AgAuTe ₄ | 4x10 ⁻⁶ a 2x10 ⁻⁵ | |
| Bauxita | Al ₂ O ₃ .nH ₂ O | 2x10 ² a 6x10 ³ | |
| Braunita | Mn ₂ O ₃ | 0.16 a 1.2 | |
| Cuprita | CU ₂ O | 1X10 ⁻³ a 300 | 30 |
| Cromita | FeCr ₂ O ₄ | 1 a 1X10 ⁶ | |
| Especularita | Fe ₂ O ₃ | | 6x10 ⁻³ |
| Hematita | FeO ₃ | 3.5X10 ⁻³ a 1X10 ⁷ | |
| Limonita | Fe ₂ O ₃ .H ₂ O | 1X10 ⁻³ a 1X10 ⁷ | |
| Magnetita | Fe ₃ O ₄ | 5X10 ⁻⁵ a 5.7X10 ³ | |
| Ilmenita | FeTiO ₃ | 1X10 ⁻³ a 50 | |
| Wolframita | Fe,Mn,WO ₄ | 10 a 1x10 ⁵ | |
| Manganetita | MnO(OH) | 1X10 ⁻² a ^{0.3} | |
| Pirolusita | MnOp ₂ | 5X10 ⁻³ a 10 | |
| Cuarzo | SiO ₂ | 4X10 ¹⁰ a 2X10 ¹⁴ | |
| Casiterita | SnO ₂ | 4X10 ⁻⁴ a 1X10 ⁴ | 0.2 |
| Rutilo | TiO ₂ | 30 a 1 000 | 500 |
| Uraninita | UO ₂ | 1 a 200 | |
| Anhidrita | CaSO ₄ | | 10 ⁹ |
| Calcita | CaCo ₃ | | 2x10 ¹² |
| Fluorita | CaF ₂ | | 8X10 ¹³ |
| Siderita | Fe (CO ₃) ₃ | | 70 |
| Halita | NaCl | 30 a 1x10 ¹³ | |
| Silvita | KC ₁ | 1x10 ¹¹ a 1x10 ¹² | |
| Diamante | C | 10 a 1x10 ¹⁴ | |

Tabla 1.4 Resistividades de minerales (Telford, 1976) (continuación)

| Resistividad (ohm-m) | | | |
|------------------------------------|------------------------------------|---|-------------------------------------|
| Mineral | Fórmula | Intervalo | Promedio |
| Calcita | CaCO ₃ | | 2x10 ¹² |
| Fluorita | CaF ₂ | | 8X10 ¹³ |
| Siderita | Fe (CO ₃) ₃ | | 70 |
| Halita | NaCl | 30 a 1x10 ¹³ | |
| Silvita | KC ₁ | 1x10 ¹¹ a 1x10 ¹² | |
| Diamante | C | 10 a 1x10 ¹⁴ | |
| Serpentina | | 2x10 ² a 3x10 ³ | |
| Hornblenda | | 2x10 ² a 1x10 ⁶ | |
| Mica | | 2x10 ² a 1x10 ¹⁴ | |
| Biotita | | 2x10 ² a 1x10 ⁶ | 2x10 ² a 10 ⁶ |
| Flogopita | | 1x10 ¹¹ a 1x10 ¹² | |
| Carbón bituminoso | | 0.6 a 1x10 ⁵ | |
| Carbones (varios) | | 10 a 1x10 ¹¹ | |
| Antracita | | 1x10 ⁻³ a 2x10 ⁵ | |
| Lignito | | 9 a 200 | |
| Mellorita (caolinita) | | | 30 |
| Aguas meteóricas | | 30 a 1x10 ³ | |
| Aguas superficiales (rocas ígneas) | | 0.1 a 3x10 ³ | |
| Aguas superficiales (sedimentos) | | 10 a 100 | |
| Aguas de suelos | | | 100 |
| Aguas naturales (rocas ígneas) | | 0.5 a 150 | 9 |
| Aguas naturales (sedimentos) | | 1 a 100 | 3 |

Tabla 1.5 Resistividades de mineralizaciones (Telford, 1976)

| Mineralización | Otros minerales | Ganga | Resistividad |
|----------------------------|---------------------------------|---------------|---------------------------------------|
| Pirita (por ciento) | | | |
| 18 | 2 por ciento (calcio) | 80 por ciento | 300 |
| 40 | 20 por ciento | 40 | 130 |
| 60 | 5 por ciento(ZnS)+15 por ciento | 20 | 0.9 |
| 75 | 10 por ciento(ZnS)+5 por ciento | 10 | 0.14 |
| 95 | 5 por ciento(ZnS) | | 1 |
| 95 | | 5 | 7 |
| Pirrotita (por ciento) | | | |
| 41 | 59 por ciento | | 2.2x10 ⁻⁴ |
| 58 | | 42 | 2.3x10 ⁻⁴ |
| 79 | | 21 | 1.4x10 ⁻⁵ |
| 82 | | 18 | 8.5x10 ⁻⁵ |
| 95 | | 5 | 1.4x10 ⁻⁵ |
| SbS ₂ en cuarzo | | | 4x10 ³ a 3x10 ⁷ |

Tabla 1.5 Resistividades de mineralizaciones (Telford, 1976) (continuación)

| Mineralización | Otros minerales | Ganga | Resistividad |
|----------------------------------|-------------------|--------------------------------|---|
| FeAsS 60 por ciento | FeS 20 por ciento | 20 por ciento SiO ₂ | 0.39 |
| FeAsS | | | 1X10 ⁻⁴ a 1X10 ⁻² |
| CuFeS ₄ | | | 3x10 a 3 |
| Cu ₅ FeS ₄ | | 60 por ciento SiO ₂ | 7x10 ⁻² |

Tabla 1.6 Resistividades de mineralizaciones (Telford, 1976)(continuación)

| Mineralización | Otros minerales | Ganga | Resistividad |
|--|-----------------------------------|-----------------------|--|
| Cu ₅ FeS ₄ 40 por ciento | | | 2x10 ⁴ |
| Fe, Mn, EO ₄ 80 por ciento | CoAsS 20 % | | 10 ³ a 10 ⁷ |
| Fe, Mn, WO ₄ | | | 7x10 ⁻² |
| PbS, masivo | | | 0.8 |
| PbS, no masivo | | | 1x10 ⁻² a 3 |
| PbS 50-80 por ciento | | | 0.1 a 300 |
| Fe ₂ O ₃ , masivo | | | 2.5x10 ³ |
| Fierro Fe ₃ O ₄ 60 por ciento | | | 45 |
| Fe ₃ O ₄ de metamorfismo de contacto | | | 0.5 a 10 ² |
| Óxido de hierro café | | | 8x10 ² a 3x10 ⁶ |
| 75 por ciento de óxido de hierro café | | 25 % | 2x10 ⁴ a 8x10 ⁵ |
| Fe ₂ O ₃ grano fino | | | 2.5X10 ³ |
| Fe ₃ O ₄ | | | 5x10 ³ a 8X10 ³ |
| Fe ₃ O ₄ en pegmatita | | | 7x10 ³ a 2x 10 ⁵ |
| Zinc (%) | | | |
| 30 % | 5 % PbS, 15 % FeS | 50 % | 0.75 |
| 70 % | 3 % calcio, 17 % PbS, 10 % FeS | | 20 |
| 80 % | 10 % PbS, 10 por % FeS | | 1.7x 10 ³ |
| 80 % | 2 % calcio 1 % PbS, 2 % FeS | 15 % | 1.3 |
| 90 % | 5 % PbS | 5 % | 130 |
| Grafito lajeado | | | 0.13 |
| Grafito masivo | | | 10 ⁻⁴ a 5x10 ⁻³ |
| Mos ₂ | | | 2x10 ² a 4x10 ³ |
| MnO ₂ mineral coloidal | | | 1.6 |
| CU ₂ S | | | 3x10 ⁻² |
| CuFeS ₂ | | | 10 ⁻⁴ a 1 |
| CuFeS ₂ 80 % | 10 % FeS | 10 % | 0.66 |
| CuFeS ₂ 90 % | 2 % FeS | 8 % Si O ₂ | 0.65 |
| FeCr ₂ O ₄ | | | 103 |
| FeCr ₂ O ₄ 95 % | | 5 % | 1.2X10 ⁴ |

Tabla 1.7 Resistividades de rocas ígneas y metamórficas (Telford, 1976)

| Tipo de roca | Intervalo de resistividades (ohm-m) |
|----------------------------------|--|
| Granito | 3x10 ² a 10 ⁶ |
| Pórfido granítico | 4.5x10 ³ (húmedo) a 1.3x10 ⁶ |
| Pegmatita (pórfido feldespático) | 4x10 ³ (húmedo) |
| Albita | 3x10 ² (húmedo) a 3.3x10 ³ (seco) |
| Sienita | 102 a 10 ⁶ |
| Diorita | 104 a 10 ⁵ |
| Pórfido de diorita | 1.9x10 ³ (húmedo) a 2.8x10 ⁴ (seco) |
| Porfírita | 10 ⁻⁵ x10 ⁴ (húmedo) a 3.3x10 ³ (seco) |
| Pórfido carbonizado | 2.5x10 ³ (húmedo) a 6x10 ⁴ (seco) |
| Pórfido de cuarzo | 3x10 ² a 9x 10 ⁵ |
| Diorita cuarzosa | 2x10 ⁴ a 2x10 ⁶ (hum) a 1.8x10 ⁵ (seco) |

Tabla 1.8 Resistividades de rocas ígneas y metamórficas (Telford, 1976)(continuación)

| Tipo de roca | Intervalo de resistividades (ohm-m) |
|---------------------|---|
| Pórfidos (varios) | 60 a 104 |
| Dacita | 2x10 ⁴ (húmedo) |
| Andesita | 4.5x10 ⁴ (húmedo) a 1.7x10 ² (seco) |
| Pórfido de diabasa | 103(húmedo) a 1.7x10 ⁵ (seco) |
| Diabasa (varios) | 201 a 5x10 ⁷ |
| Lavas | 102 a 5x10 ⁴ |
| Gabro | 103 a 10 ⁶ |
| Peridotita | 3x10 ³ (húmedo) a 6.5x10 ³ (seco) |
| Corneana | 8x10 ³ (húmedo) a 6x10 ⁷ (seco) |
| Esquistos | 201 a 104 |
| Tobas | 2x10 ³ (húmedo) a 1x10 ⁵ (seco) |
| Esquisto de grafito | 101 a 102 |
| Lajas (varios) | 6x10 ² a 4x10 ⁷ |
| Gneises (varios) | 6.8x10 ⁴ (húmedo) a 3x10 ⁶ (seco) |
| Mármol | 102 a 2.5x10 ⁸ (seco) |
| Eskarn | 2.5x10 ² (húmedo) a 2.5x10 ⁸ (seco) |
| Cuarcitas (varias) | 10 a 2x10 ⁸ |

- La resistividad de la roca sin la presencia del agua
- La porosidad de la roca
- La resistividad del agua contenida en la roca
- El grado de saturación
- La tortuosidad (relación entre longitud de los poros y la longitud de la roca en estudio)

Los anteriores parámetros están ligados por la siguiente relación:

$$p_r = \frac{T^2}{P} p_a = F_a p_a \quad \text{Ecuación 1.5}$$

donde:

P_r = Resistividad de la roca

P_a = Resistividad del agua

T = Tortuosidad

P = Porosidad

Tabla 1.9 Resistividades de rocas sedimentarias (Telford, 1976)

| Tipo de roca | Intervalo de resistividad (ohm-m) |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| Lutitas consolidadas | 20 a 2×10^3 |
| Argilitas | 10 a 8×10^2 |
| Conglomerados | 2×10^3 a 10^2 |
| Areniscas | 1 a 6.4×10^8 |
| Lutitas | 50 a 1×10^7 |
| Dolomías | 3.5×10^2 a 5×10^3 |
| Arcillas saturadas no consolidadas | 20 |
| Margas | 3 a 70 |
| Arcillas | 1 a 100 |
| Aluviones y arenas | 10 a 800 |
| Arenas con petróleo | 4 a 800 |

F = Factor de formación

Cuando se toma en cuenta la saturación se obtiene un parámetro conocido como índice de resistividad, definido como:

$$I = Sn \quad \text{Ecuación 1.6}$$

donde:

I = Índice de resistividad

S = Saturación de agua en la roca

n = Exponente que de acuerdo con diversos autores, varía de 1.98 a 2, modificándose la Ecuación 1.5 resulta:

$$p_r = IFp_a \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Tomando en cuenta la relación anterior, es importante conocer los órdenes de resistividad esperados tanto de las rocas como de las aguas que las saturan, así como su porosidad promedio. La resistividad es altamente variable, aun en un mismo tipo de roca. No obstante, se puede definir un intervalo característico de resistividad para un tipo específico de roca dentro de una región de interés.

La resistividad eléctrica del agua varía en un amplio intervalo. En estado puro, el agua es poco conduc-

tora, llegando a tener resistividades hasta de 1×10^4 ohm m. Sin embargo, las aguas naturales muestran buena conductividad eléctrica debido a las sales que llevan en solución. Su cantidad y clase depende del tipo de roca por donde el agua haya circulado, ya sea superficialmente o en forma subterránea.

Los intervalos de variación de la resistividad de las aguas naturales se presentan en la Tabla 1.10:

Tabla 1.10 Resistividad del agua (Orellana, 1972)

| Tipo de agua | Intervalo de resistividad (ohm-m) |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| Aguas de lago | 1×10^3 a 3×10^3 |
| Aguas dulces superficiales | 10 a 1×10^3 |
| Aguas salobres superficiales | 2 a 10 |
| Aguas subterráneas | 1 a 20 |
| Aguas de lagos salados | 0.1 a 1 |
| Aguas marinas | 0.2 |
| Aguas de impregnación de roca | 0.03 a 10 |

La porosidad es también un parámetro que varía mucho no sólo de roca a roca, sino también dentro de un mismo tipo de roca, y depende de factores como los diferentes grados de compactación, el fracturamiento, la homogeneidad en el tamaño de los granos que constituyen la roca, su edad, etc. En la bibliografía del tema se pue-

den encontrar tablas de porosidad para diferentes tipos de roca como lo muestra la Tabla 1.11 (Keller y Frischknecht, 1966).

La presencia de materiales arcillosos es otro parámetro a considerar al tratar de evaluar las variaciones de la resistividad de una roca cuando se encuentra total o parcialmente saturada de agua, ya que la interacción entre la matriz de la roca y el agua contenida en sus poros produce dos fenómenos: la conducción superficial y la ionización de los minerales arcillosos, que afectan las mediciones de la resistividad global de las rocas en estudio.

1.3. COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE LAS ROCAS

En el subsuelo el agua se encuentra distribuida en dos grandes zonas: la no saturada (o de aireación) y la saturada. La primera de ellas, comprendida entre la superficie del terreno y la superficie freática, se subdivide, a su vez, en

tres subzonas: del suelo, intermedia y capilar (Ilustración 1.12).

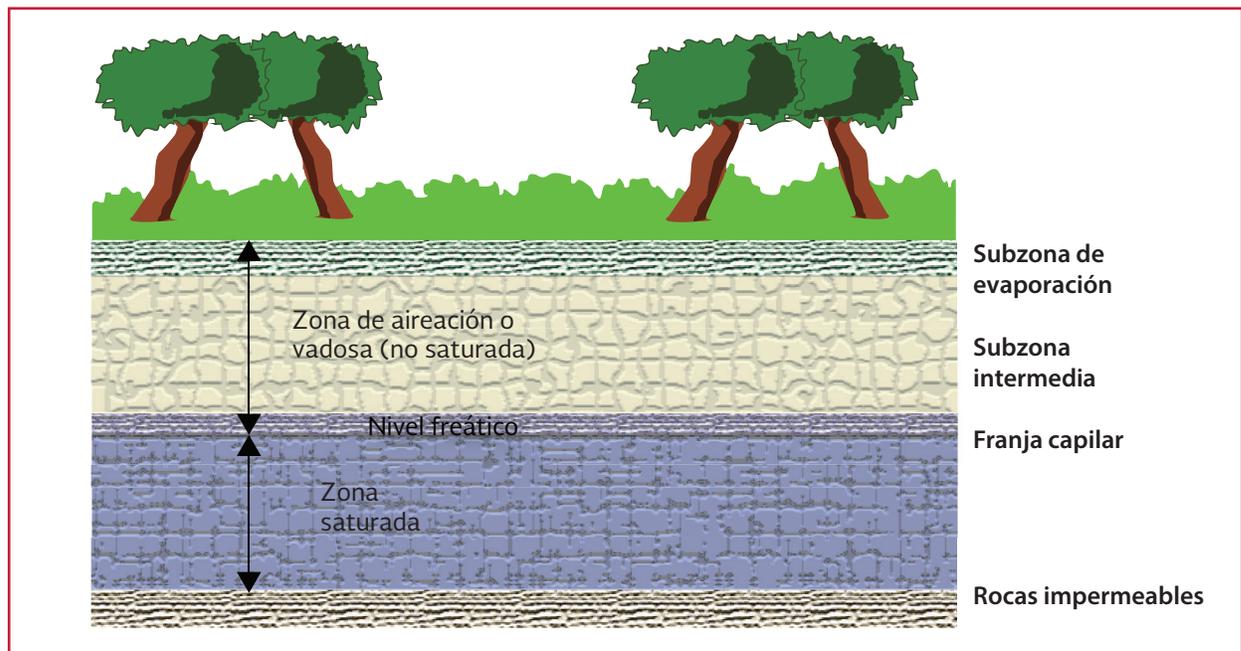
La subzona del suelo mantiene un continuo intercambio de humedad con la atmósfera. Su contenido de humedad varía a consecuencia de las lluvias, el riego, el drenaje y la evapotranspiración. La subzona capilar se encuentra por arriba de la superficie freática y tiene una altura inversamente proporcional al tamaño de los poros. Entre ambas se extiende la subzona intermedia, que contiene agua adherida a las partículas y, temporalmente, agua en movimiento descendente hacia la zona saturada. En las tres subzonas los poros están parcialmente llenos de agua, aunque temporalmente pueden estar totalmente saturados.

La zona saturada está limitada superiormente por la superficie freática, definida por el agua que se encuentra a la presión atmosférica; abajo de esta superficie, los materiales se encuentran totalmente saturados. Por convención, se denomina agua subterránea solo a la contenida en esta zona, diferenciándola del agua presente en la zona no saturada.

Tabla 1.11 Variación de la porosidad de la roca con la edad (Keller y Frischknecht, 1966)

| Edad | Porosidad tipo de roca | Granular |
|----------------|---|----------|
| | (%) | |
| Precámbricas | Rocas ígneas y rocas metamórficas de alto grado | 0 a 2 |
| Precámbricas | Sedimentos y sedimentos de alto grado de metamorfismo | 1 a 8 |
| Paleozoica | Volcanoclásticas | 5 a 30 |
| Paleozoica | Areniscas y pizarras | 5 a 30 |
| Paleozoica | Calizas | 2 a 10 |
| Postpaleozoica | Volcanoclásticas | 10 a 60 |
| Postpaleozoica | Areniscas y pizarras | 10 a 40 |
| Postpaleozoica | Calizas | 4 a 20 |
| Cuaternaria | Rocas ígneas | 0 a 10 |

Ilustración 1.12 Distribución del agua en el subsuelo



1.3.1. ACUÍFEROS, ACUITARDOS Y ACUICLUDOS

Dentro de la zona saturada se encuentran formaciones o unidades geológicas que tienen comportamiento hidrogeológico diferente: los acuíferos, unidades que pueden transmitir agua en cantidades significativas; los acuitardos, unidades que a pesar de su baja permeabilidad pueden transmitir o ceder cantidades de agua considerables a escala regional y los acuicludos, que son unidades prácticamente impermeables.

Las definiciones anteriores resultan vagas, por ser cualitativas y generales. Por ejemplo, el término acuífero puede aplicarse a materiales con permeabilidad dentro de un intervalo muy amplio de valores. Por tanto, los términos deben aplicarse en sentido relativo dentro de un marco de referencia específico. Así, se denominan acuíferos a las unidades más permeables en la localidad de interés, y acuitardos, a las unidades

de permeabilidad comparativamente menor. El término acuicludo es poco utilizado, ya que son raras las rocas rigurosamente impermeables.

También influyen las escalas de tiempo y de tamaño. En un ámbito local relacionado con un pozo de bombeo se acostumbra definir como acuífero al estrato o conjunto de estratos captados por su cedazo, mientras que en un ámbito regional el mismo término engloba a un conjunto de rocas que se comportan como una unidad hidrogeológica.

1.3.2. TIPOS DE ACUÍFEROS

Desde el punto de vista hidráulico, se definen tres tipos de acuíferos: confinados, semiconfinados y libres. El confinado es aquel que se encuentra verticalmente limitado por acuicludos. El semiconfinado es aquel que está limitado verticalmente por uno o dos acuitardos que

le ceden agua de su propio almacenamiento o se la transmiten desde acuíferos adyacentes (Ilustración 1.13).

Los acuíferos confinados y semiconfinados funcionan como conductos a presión. Su espesor saturado no varía a lo largo del tiempo y su nivel de agua (piezométrico) se encuentra arriba de su techo. La superficie imaginaria definida por los niveles de agua de los pozos que lo captan se llama superficie piezométrica, sus funciones corresponden a cambios en la presión del agua, y en un sitio dado puede hallarse por arriba o por abajo del nivel freático. Donde el nivel piezométrico se halla arriba del terreno, los pozos que se utilizan son los artesianos brotantes.

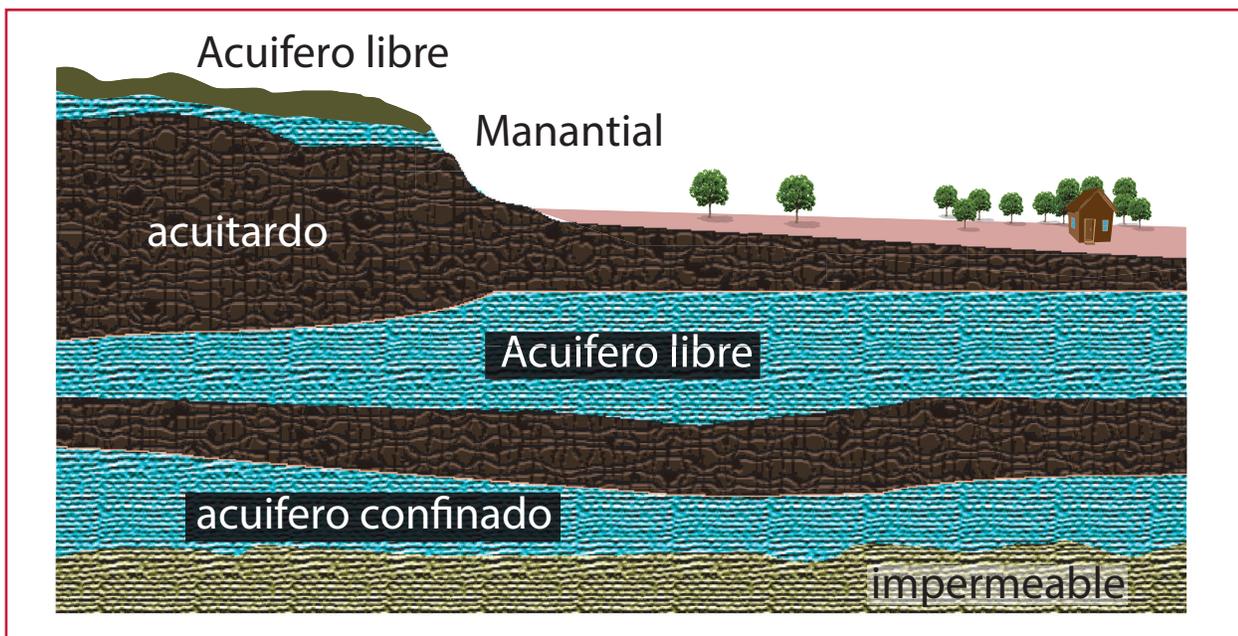
El tipo de acuífero puede variar en el tiempo, cuando se extrae agua mediante captaciones. Algunos se comportan como confinados al inicio del bombeo y gradualmente se transforman en semiconfinados después de cierto tiempo. Otros son inicialmente de tipo confinado o semiconfinado y se convierten en libres, cuando

el bombeo abate la superficie piezométrica bajo su techo. En un sitio dado, la superficie freática está representada aproximadamente por el nivel de agua registrado en norias o pozos someros que apenas penetran en la zona saturada.

El acuífero libre tiene por límite superior una superficie freática. Funciona como un conducto abierto y su espesor saturado varía en el tiempo con las fluctuaciones de esa superficie. Tiene ventajas con respecto a los confinados y semiconfinados. La primera, cede volúmenes de agua mucho mayores por unidad de abatimiento del nivel de agua. La segunda, tiene mayor oportunidad de recarga, por estar abierto a la superficie. Un acuífero libre se considera cerrado cuando entre la superficie del terreno y su nivel freático se extiende un horizonte de baja permeabilidad que obstaculiza su alimentación local.

Desde el punto de vista hidrogeológico, es de utilidad práctica clasificar a los acuíferos y sus materiales en dos grandes grupos: los no con-

Ilustración 1.13 Tipos de acuíferos



solidados y los consolidados. Los primeros incluyen a los depósitos aluviales (gravas, arenas, limos y arcillas), a los lacustres, a los eólicos y a los materiales coluviales (depósitos de pie de monte), entre otros.

Estos materiales constituyen un medio hidráulicamente continuo. Los de grano grueso alojan importantes acuíferos y los más porosos se portan como acuitardos.

Por su baja porosidad primaria, los materiales consolidados tienen menos espacios para transmitir y almacenar el agua. Es por ello que su comportamiento hidrogeológico depende principalmente de su porosidad secundaria. En las rocas sedimentarias de composición detrítica (lutitas, limolitas, areniscas y conglomerados) las características hidráulicas son determinadas por su granulometría, su fracturamiento y su grado de cementación. Las de grano grueso poco cementadas, y las fracturadas, suelen constituir acuíferos de regular a buena permeabilidad, mientras que las de grano fino se comportan como acuíferos poco permeables o como acuitardos.

Las rocas carbonatadas (calizas, margas, dolomías) pueden ser acuíferos de alta permeabilidad cuando su porosidad es alterada por disolución. Por último, las rocas cristalinas ígneas intrusivas y metamórficas se comportan como acuitardos o como acuíferos de baja permeabilidad, cuando contienen fracturas no obstruidas.

1.4. DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES ACUÍFEROS DE MÉXICO

El marco geológico mexicano es sumamente variado. Desde el punto de vista geohidrológico revisten interés las rocas sedimentarias del

período Cretácico hasta el período Reciente. A continuación se describe la distribución geográfica y las características de aquellas zonas que constituyen los principales acuíferos.

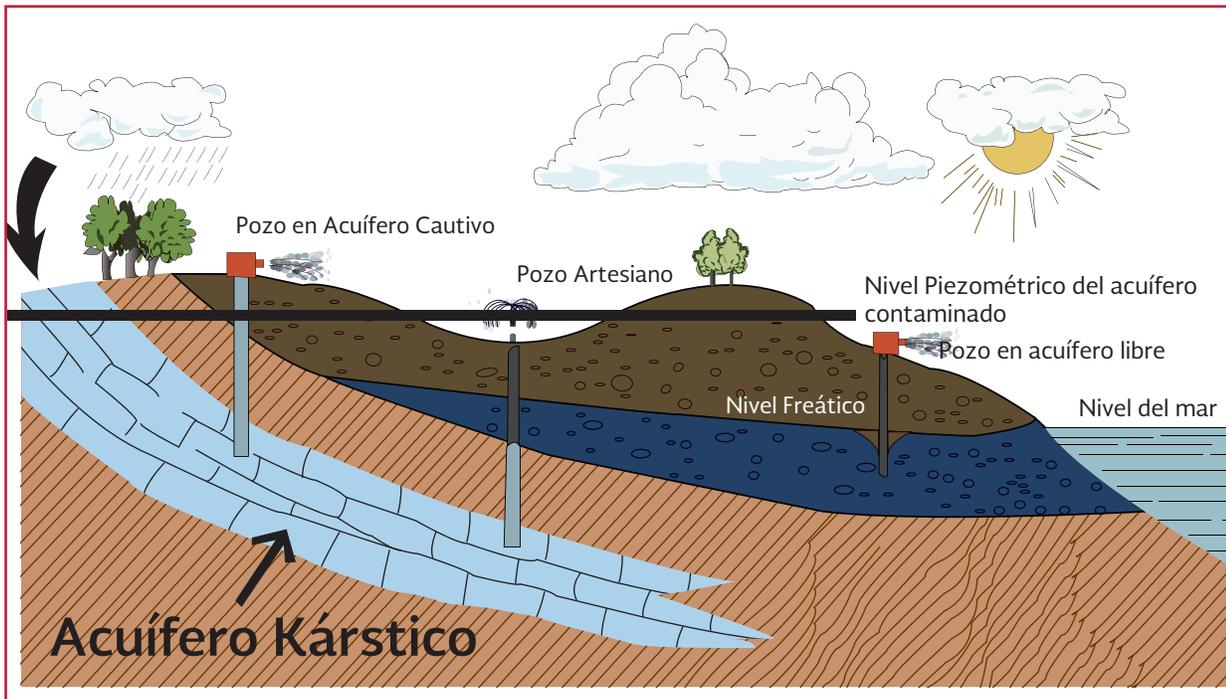
1.4.1. CALIZAS ACUÍFERAS DEL NORESTE

Las calizas acuíferas están ampliamente distribuidas en la porción noreste de la República Mexicana; forman parte de las estructuras de la Sierra Madre Oriental. Están expuestas en forma discontinua en una gran superficie, aunque solo muestran características hidrogeológicas favorables en zonas o fajas arrecifales.

Estos acuíferos están alojados en formaciones que reciben varios nombres, por ejemplo, se denominan Aurora y Tupido en el estado de Nuevo León. Su espesor llega a ser de varios cientos de metros. A pesar de su gran extensión, las fallas y los cambios de facies rompen su continuidad, dando lugar a sistemas de flujo relativamente independientes entre sí, algunos de ellos de reducida extensión.

La porosidad y la permeabilidad primarias de estas rocas son poco significativas, pero sus características secundarias, asociadas con fracturas y conductos de disolución, son muy favorables para la captación de agua subterránea. Su alta transmisividad se traduce en pozos de gran rendimiento. Son comunes los pozos con caudales específicos mayores de 30 L/s. Sin embargo, debido a la errática distribución de fracturas y conductos, son acuíferos muy heterogéneos con respecto a sus características hidráulicas. Por lo mismo, es común encontrar pozos de alta producción muy próximos a otros de producción baja o prácticamente nula (Ilustración 1.14).

Ilustración 1.14 Acuíferos Kársticos



Desde el punto de vista hidráulico estos acuíferos solo funcionan como libres en las estructuras donde afloran. Fuera de estas áreas, están confinados por formaciones de permeabilidad baja y gran espesor. En estas condiciones, su coeficiente de almacenamiento suele ser sumamente bajo, a lo cual se debe la gran magnitud de las fluctuaciones piezométricas provocadas por el bombeo y la recarga.

La gran capacidad transmisora de los acuíferos calizos y su baja capacidad de almacenamiento se traducen en una gran difusividad hidráulica. Debido a esta característica, los niveles piezométricos responden rápidamente a la recarga, aun cuando tenga lugar en áreas distantes del sitio de observación. Igualmente rápida es la propagación de los efectos del bombeo.

La recarga de los acuíferos calizos tiene lugar en las crestas de las estructuras anticlinales donde afloran y por la aportación de las formaciones sobreyacentes. Su descarga natural tiene lugar a lo largo de los cauces de las corrientes que cortan las estructuras o mediante manantiales. Asimismo, donde la estructura geológica lo permite, también se presenta una descarga subterránea que alimenta el relleno sobreyacente.

El agua subterránea circula de las áreas de recarga hacia las de descarga, siguiendo trayectorias irregulares determinadas por la distribución de fracturas y conductos, por la estructura geológica y por la posición de los niveles base de descarga. En algunas áreas, la configuración topográfica y la distribución piezométrica se combinan para originar espectaculares manifestaciones de artesianismo. Algunos pozos brotan temporal o

permanentemente con cargas hidráulicas de varias decenas de metros arriba de la superficie del terreno.

Hace unos 30 años, los pozos exploratorios profundos revelaron que las calizas cretácicas de la porción noreste de México constituyen acuíferos de gran potencialidad. Se inició entonces la construcción de pozos para captarlos, alcanzando muchos de ellos profundidades inusitadas para tal fin. Entre los campos de pozos de esa región destacan los que abastecen a las ciudades de Monterrey y Saltillo, los cuales captan calizas acuíferas a profundidades mayores de 500 m y hasta de 1 500 m.

1.4.2. CALIZAS DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

En la península de Yucatán, localizada en la porción sureste de México, las rocas calizas de plataforma, con gran desarrollo kárstico, constituyen uno de los sistemas geohidrológicos más peculiares de nuestro país. La permeabilidad secundaria de estos acuíferos es alta y está asociada con un laberinto de conductos de disolución erráticamente distribuidos. Debido a su heterogeneidad, el rendimiento de los pozos es muy variado; algunos pozos que interceptan oquedades de gran tamaño bombean caudales mayores de 100 L/s con abatimientos de unos cuantos centímetros. Aun cuando a escala regional se trate de acuíferos de tipo libre, su coeficiente de almacenamiento es bajo (menor que 0.1 en promedio) debido a la baja porosidad de la masa calcárea.

En la península de Yucatán la abundante precipitación pluvial, la topografía sumamente plana y la alta capacidad de infiltración, se combinan

para provocar una cuantiosa recarga. Sin embargo, la presencia de la cuña de agua marina a poca profundidad que se extiende tierra adentro en su posición natural hasta distancias de varias decenas de kilómetros del litoral, impone restricciones a la captación de agua subterránea.

Debido al reducido espesor de agua dulce y a la presencia del agua marina subyacente, los abatimientos permisibles en los pozos son apenas de una fracción de metro. Por tanto, la terminación y la operación de los pozos deben seleccionarse cuidadosamente para no provocar la salinización del pozo y del acuífero. Para prevenir este daño, en la faja costera de Quintana Roo y en la isla de Cozumel se han utilizado captaciones de un diseño especial, con las que el agua ingresa únicamente a través de ventanas abiertas en el tramo superior del ademe, a elevaciones arriba del nivel medio del mar.

1.4.3. ACUÍFEROS RIOLÍTICOS

En el altiplano mexicano, principalmente en los estados de Durango, San Luis Potosí y Zacatecas, se encuentran rocas ígneas de composición riolítica que revisten gran interés desde el punto de vista geohidrológico. Su efusión tuvo lugar durante el período Terciario a través de gigantescas fisuras. Las rocas predominantes son las tobas riolíticas (ignimbritas), que afloran en grandes extensiones y forman parte importante del relleno de las fosas tectónicas.

Las características hidráulicas intrínsecas de las rocas riolíticas son desfavorables. No obstante, donde han sido fracturadas por movimientos tectónicos, presentan capacidad transmisora significativa. En tales condiciones sus afloramientos son buenos receptores de la recarga, y

bajo el nivel regional de saturación, constituyen acuíferos cuya permeabilidad depende de su grado de fracturamiento.

Generalmente, subyacen a depósitos lacustres y materiales aluviales y por consiguiente, funcionan como acuíferos confinados o semiconfinados de bajo coeficiente de almacenamiento. A pesar de esta característica desfavorable, los volúmenes de rocas riolíticas saturadas son tan gigantescos, que la reserva almacenada en ellos resulta cuantiosa.

Los acuíferos riolíticos constituyen sistemas hidrodinámicos de extensión regional, conectados con acuíferos de otro origen y con potentes acuitardos. Debido a la heterogeneidad de estos sistemas, es frecuente registrar variaciones importantes de carga hidráulica y calidad del agua entre los estratos. Asimismo, se registra una temperatura moderada del agua, cuyo origen puede ser hidrotermal.

La principal fuente de recarga de estos acuíferos es el escurrimiento superficial que se infiltra a lo largo de los cauces y en los flancos de las montañas. Su descarga natural alimenta subterráneamente a los materiales aluviales sobreyacentes. Hasta hace poco tiempo los acuíferos riolíticos no eran explotados directamente en gran escala, pero las exploraciones revelaron que constituyen una fuente subterránea importante.

1.4.4. ACUÍFEROS BASÁLTICOS

Los acuíferos constituidos por rocas ígneas extrusivas básicas se encuentran principalmente en la Faja Volcánica Transmexicana, provincia fisiográfica enclavada en la porción central de la República. Gran número de aparatos originados por el vulcanismo Cuaternario, expulsaron lavas

y piroclásticos de composición predominantemente basáltica.

Estas rocas rellenaron profundas fosas tectónicas, junto con depósitos lacustres y materiales aluviales, dando lugar a "recipientes subterráneos" de varios cientos de metros de espesor.

Dentro de estos gigantescos recipientes, los derrames basálticos fracturados forman los acuíferos más favorables. Se caracterizan por su elevada permeabilidad, asociada con fracturas, "tubos de flujo" y juntas de enfriamiento. Los derrames de textura vesicular tienen además alta porosidad, al igual que los piroclásticos gruesos no cementados, abundantes en las estribaciones de los aparatos volcánicos.

Los afloramientos de estas rocas son excelentes receptores y transmisores de la recarga. En las partes bajas, donde generalmente subyacen a depósitos lacustres y a aluvión de menor permeabilidad, funcionan como acuíferos confinados o semiconfinados de baja capacidad de almacenamiento.

La heterogeneidad y anisotropía del relleno, con respecto a sus características hidráulicas, producen notables diferencias de carga hidráulica, temperatura y calidad del agua en sentido vertical.

Cuando están separados por acuitardos, los derrames acuíferos funcionan localmente con cierta independencia. Sin embargo a escala regional, todos los estratos se suponen hidráulicamente conectados, lo cual es además propiciado por el bombeo de pozos con características constructivas variadas. Así, los acuíferos basálticos de esa región forman parte de sistemas hidrodinámicos gigantescos y complejos, de gran capacidad transmisora

asociada con acuíferos de enorme capacidad de almacenamiento, relacionada a su vez con los materiales piroclásticos, lacustres y aluviales.

En algunas cuencas la estructura geológica y la posición del nivel base de descarga dan lugar a la formación de sistemas regionales que comprenden a dos o más cuencas hidrográficas.

En diversas áreas de esta región se observan manifestaciones geotérmicas, desde termalismo moderado del agua subterránea, hasta sistemas geotérmicos de vapor y agua caliente.

El termalismo registrado en pozos y manantiales varía desde unos cuantos grados arriba de la media anual del aire, hasta temperaturas próximas a la de ebullición.

Estos sistemas hidrotermales convectivos están asociados a fuentes de calor geotérmicas, tectónicas y volcánicas. Sistemas de este tipo se encuentran en los estados de Michoacán y Puebla.

La precipitación pluvial y el escurrimiento superficial son las principales fuentes de recarga de los acuíferos basálticos de esta región. Su descarga natural tiene lugar en corrientes superficiales y mediante manantiales. Son explotados por medio de gran número de pozos de usos municipal, agrícola e industrial.

1.4.5. ACUÍFEROS ALUVIALES

Los materiales aluviales, ampliamente expuestos en las partes bajas de las cuencas, constituyen los acuíferos más jóvenes. Se trata de materiales clásticos producto de la erosión de las rocas expuestas en las áreas montañosas, gravas, arenas, limos y arcillas, que forman estratos interdigitados de geometría irregular.

En las regiones donde predominan estos acuíferos, los materiales aluviales forman solo una cobertura superficial muy delgada en relación con el espesor total del relleno de las fosas tectónicas y bolsones. Por el contrario, constituyen la mayor parte del relleno acuífero en los valles fluviales y planicies costeras enclavadas en la porción occidental de la República Mexicana, donde su espesor alcanza valores de decenas a centenas de metros. En las extensas planicies costeras forman potentes rellenos con el aluvión antiguo subyacente (Ilustración 1.15).

La granulometría, el grado de compactación y el grado de cementación controlan las características hidráulicas de los materiales aluviales. Los de grano grueso, arenas y gravas, forman los acuíferos más favorables en cuanto a su permeabilidad y rendimiento específico. Por ejemplo, algunos acuíferos aluviales no confinados de la península de Baja California y del estado de Sonora, tienen permeabilidad mayor de 10^{-2} cm/s, transmisividad mayor de 10^{-1} m²/s y rendimiento específico mayor de 0.2.

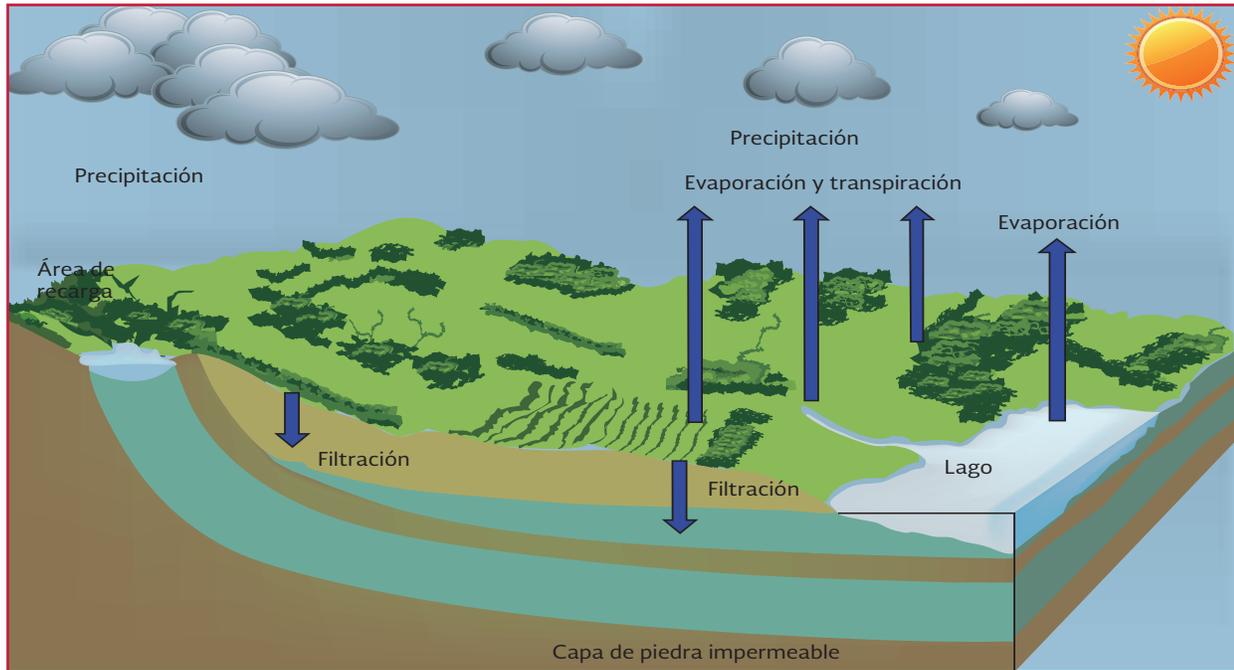
Estos materiales constituyen acuíferos menos favorables cuando están confinados o semiconfinados pues en esas condiciones su coeficiente de almacenamiento es bajo. Los materiales de grano fino funcionan como acuitardos de gran porosidad y baja permeabilidad que ceden importantes cantidades de agua a los acuíferos adyacentes.

Por su mayor comunicación con la superficie, los acuíferos aluviales tienen mayor oportunidad de recarga. Son alimentados por las fuentes naturales y las inducidas por el desarrollo, especialmente el agrícola. Su descarga natural tiene lugar principalmente por evapotranspiración y a lo largo de cauces.

En muchos casos, la recarga y la descarga de los acuíferos subyacentes tiene lugar a través de la cobertura aluvial. Debido a que son acuíferos de amplia distribución geográfica y los más

someros, fueron los primeros en ser explotados intensivamente. Por ello, muchos de ellos están sometidos a seria sobreexplotación e incluso algunos ya fueron totalmente agotados.

Ilustración 1.15 Acuífero aluvial



2

EXPLORACIÓN HIDROGEOLÓGICA

El agua subterránea es un recurso casi omnipresente. A mayor o menor profundidad, en mayor o menor cantidad y de buena o mala calidad, se puede encontrar prácticamente en cualquier sitio. El problema principal no es su localización, sino la identificación de los sitios donde se puede captar de forma económica, en cantidades suficientes y con la calidad adecuada para satisfacer necesidades específicas.

La localización de sitios favorables para el emplazamiento de captaciones de agua subterránea es relativamente sencilla en las partes bajas de cuencas donde existen acuíferos granulares, someros, extensos y con agua de buena calidad. Por el contrario, en regiones de condiciones geológicas adversas, como sucede en amplias zonas del altiplano mexicano, la localización de acuíferos para satisfacer las necesidades de agua, aun las menores, ha sido siempre un problema de difícil solución. En el transcurso de las últimas décadas, el desarrollo de los recursos hidráulicos subterráneos ha progresado rápidamente en nuestro país.

A consecuencia de ello, en la mayoría de los acuíferos accesibles, la disponibilidad de agua ya está totalmente aprovechada o comprometida. Aún más, muchos de ellos están siendo sobreexplotados, con graves efectos económicos

y ambientales. En tales casos, para satisfacer nuevas demandas de agua es necesario localizar fuentes en áreas y profundidades todavía no exploradas.

La hidrogeología, cuya base fundamental es la geología, es una ciencia multidisciplinaria en la que se utilizan métodos y técnicas variadas como la prospección geofísica, la perforación de pozos, la geoquímica de rocas y de agua, la hidráulica subterránea, la percepción remota y la modelación matemática, orientadas a la exploración y caracterización de los acuíferos. En cada caso, las técnicas dependen de los objetivos de la exploración y de las características y complejidad del marco hidrogeológico. La exploración hidrogeológica encaminada a localizar, evaluar o desarrollar el recurso hidráulico a escala regional o en zonas de hidrogeología compleja, requiere de una investigación detallada del marco geológico superficial y subterráneo, mediante la aplicación combinada de técnicas de exploración del subsuelo. Si se trata, en cambio, de seleccionar el emplazamiento de uno o varios pozos de bombeo en una zona ya desarrollada, un reconocimiento hidrogeológico local, los datos de captaciones circunvecinas y los sondeos verticales de resistividad, pueden aportar suficiente información para fijar la ubicación y el anteproyecto del pozo. En el presente libro se describen

solo los métodos aplicables para resolver problemas de tipo local. La exploración hidrogeológica regional no está considerada.

2.1. RECONOCIMIENTOS HIDROGEOLÓGICOS

2.1.1. INFORMACIÓN BÁSICA

Actualmente se dispone de un amplio conocimiento de la hidrogeología de México, gracias a los estudios realizados por diferentes dependencias oficiales, instituciones académicas y empresas privadas. Esta información está dispersa y no ha sido publicada íntegramente. No obstante, parte de ella puede ser consultada, lo que reduce el tiempo y el costo de los trabajos que son necesarios en un proyecto que atienda un problema específico.

Las principales fuentes de información hidrogeológica se enumeran en la Tabla 2.1, indicando el tipo de material que puede obtenerse en cada una de ellas.

2.1.2. MAPAS

Con los métodos exploratorios se investiga el marco físico para localizar y caracterizar las for-

maciones o unidades geológicas que constituyen los acuíferos. Por caracterización se entiende la definición de su litología, es decir, de su posición respecto a la superficie del terreno, de su geometría como la forma, la extensión y el espesor, así como de la calidad del agua que contiene y de sus condiciones de recarga y descarga.

Para la localización y caracterización de los acuíferos en la zona de interés, es conveniente consultar los mapas y fotografías aéreas disponibles antes de efectuar los reconocimientos de campo. Los mapas de mayor utilidad para tal fin, son los geológicos, los hidrogeológicos y los topográficos.

Los mapas geológicos muestran las relaciones estratigráficas, litología y distribución espacial de las unidades o formaciones geológicas expuestas en el área investigada. Algunos planos geológicos más detallados contienen datos acerca de la estructura geológica y secciones que muestran la distribución de las formaciones en el subsuelo (Ilustración 2.1).

En los planos hidrogeológicos (Ilustración 2.2) también se describe la geología y se presta mayor atención a las características litológicas que controlan el almacenamiento y la circulación del agua en el subsuelo. En estos planos se muestra, además, la información piezométrica, la eleva-

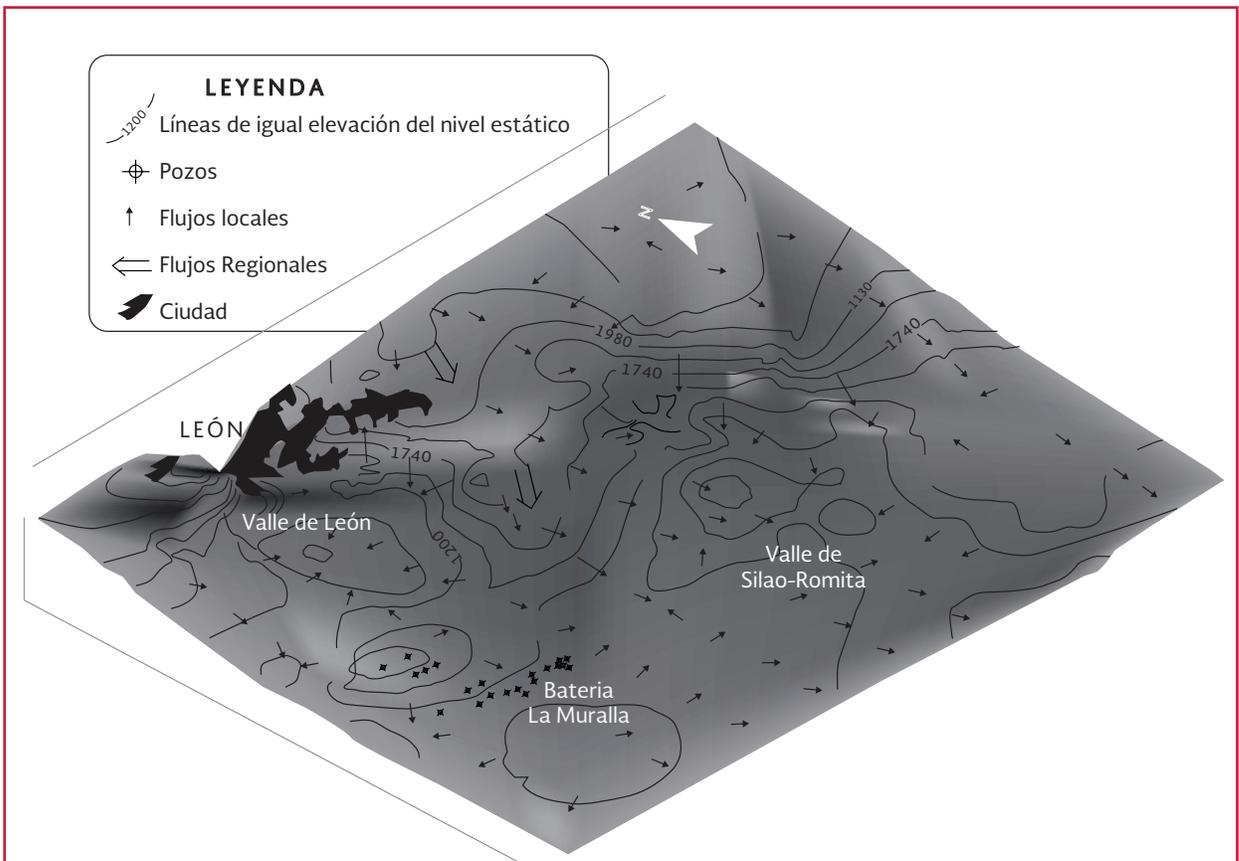
Tabla 2.1 Fuentes de información

| Fuente | Tipo de información |
|----------------------------------|---|
| Comisión Nacional del Agua | Estudios geohidrológicos, datos climatológicos, hidrométricos, piezométricos y de calidad M agua. Sinopsis geohidrológicas estatales, mapas geológicos y geohidrológicos, censo de captaciones de aguas subterránea |
| INEGI | Cartas geológicas, hidrológicas, topográficas, edafológica, fotografías aéreas e imágenes de satélite |
| Instituto de Geología UNAM | Cartas geológicas estatales |
| Instituto de Geofísica | Estudios geofísicos y geohidrológicos diversos |
| PEMEX | Estudios geofísicos, geohidrológicos, estructurales, etc. |
| Comisión Federal de Electricidad | Estudios geofísicos, geohidrológicos, estructurales, etc. |

Ilustración 2.1 Mapa geológico



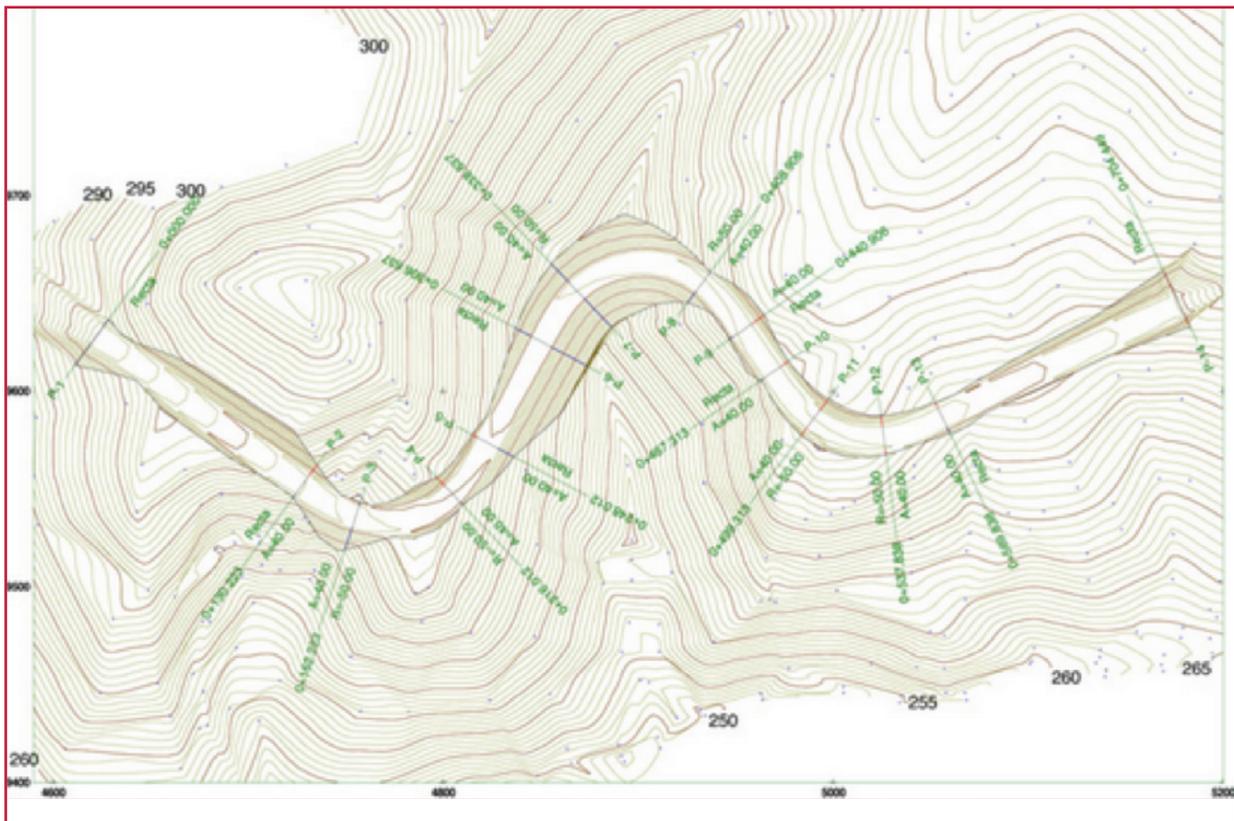
Ilustración 2.2 Plano hidrogeológico



ción de los niveles del agua subterránea, las direcciones principales del flujo subterráneo, los datos del caudal y el rendimiento de captaciones, la localización de manantiales y una clasificación de las unidades geológicas, atendiendo a su permeabilidad y comportamiento hidrogeológico (acuíferos, acuitardos o acuíclados), así como la información referente a la calidad del agua.

Los planos topográficos (Ilustración 2.3) representan la geomorfología del terreno, que tiene influencia en la distribución del agua subterránea y guarda estrecha relación con la geología. Asimismo, contienen información general de las vías de comunicación y de los elementos hidrológicos superficiales como ríos, lagos, lagunas y mares. Estos planos son utilizados en los estudios geohidrológicos para representar la localización de las captaciones de agua subterránea.

Ilustración 2.3 Plano topográfico



2.1.3. FOTOGRAFÍAS AÉREAS

A falta de mapas o como complemento de ellos, pueden utilizarse fotografías aéreas de diversas escalas, las cuales revelan información que no se aprecia sobre la superficie del terreno. Las fotografías pueden manejarse separadamente o unirse para formar mosaicos. También pueden emplearse los llamados pares fotográficos que, observados a través de un estereoscopio, muestran el relieve topográfico y facilitan la interpretación de otros aspectos.

De la interpretación de las fotografías aéreas se infiere valiosa información hidrogeológica. Por ejemplo, se puede identificar la distribución y extensión de las unidades aluviales o de otras rocas que constituyen acuíferos, la distribución e interconexión de fracturas o conductos de disolución en terrenos volcánicos o cársticos, el

grado de alteración o fracturamiento de las rocas, propiedades que influyen en su capacidad de infiltración, las características del drenaje superficial y de la vegetación (Ilustración 2.4).

La red de drenaje refleja las características de las formaciones expuestas, a su vez relacionadas con el agua subterránea. Una red difusa y con cauces mal definidos, es una manifestación de la gran capacidad de infiltración del terreno. Una red desarrollada en todas direcciones (dendrítica) es típica de formaciones homogéneas, mientras que una red desarrollada en direcciones preferentes, corresponde a terrenos heterogéneos o está relacionada con rasgos estructurales, como fallas o fracturas.

A partir de la información obtenida de mapas y fotografías aéreas, se elaboran planos y secciones hidrogeológicas de la zona de interés, en las que se representan las unidades acuíferas identificadas y el esquema de su modelo conceptual de funcionamiento que indica su posición, sus dimensiones supuestas y su superficie piezométrica, las direcciones del flujo subterráneo, la conexión con los elementos hidrogeológicos superficiales y las áreas de recarga y de descarga (Ilustración 2.5).

Ilustración 2.4 Fotografía aérea

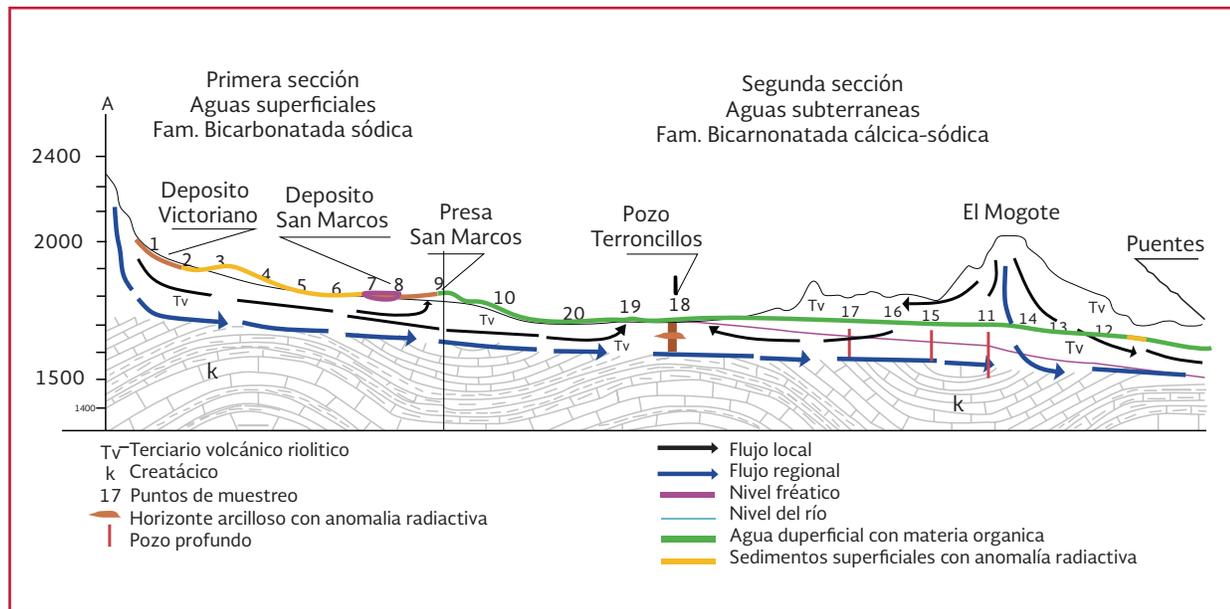


2.1.4. RECONOCIMIENTOS DE CAMPO

La información representada en los mapas o mosaicos fotográficos, es verificada mediante reconocimientos de campo de la zona investigada, para programar la exploración geofísica y en su caso, las perforaciones exploratorias, obteniendo así elementos confiables para fijar el emplazamiento de pozos de bombeo.

Durante los reconocimientos se verifica o detalla la información acerca de la zona de interés. En cuanto a los aspectos hidrogeológicos, se puede precisar la posición de los contactos geológicos, ampliar la descripción litológica e hidrogeológica de las formaciones expuestas, así como obtener datos complementarios acerca de la estructura local. En algunos casos, puede ser necesario obtener muestras de roca para su análisis petrográfico. Los pozos de bombeo que operan en la zona constituyen importantes fuentes de información hidrogeológica, ya que pueden aportar datos respecto a la posición, litología, características hidráulicas y los niveles y calidad del agua de los acuíferos. Por ello, el censo de captaciones subterráneas debe ser una de las actividades obligadas en los

Ilustración 2.5 Secciones hidrogeológicas



reconocimientos exploratorios (Ilustración 2.6). Paralelamente, se obtiene información acerca de los elementos hidrológicos superficiales, ríos, lagos, canales, etc., considerando su probable relación con las fuentes de agua subterránea. Para definir estos aspectos se debe determinar la posición de los niveles del agua superficial con respecto a la superficie freática y a los niveles piezométricos por medio de altimetría.

Dependiendo del objetivo del estudio, esta actividad puede efectuarse o no, mediante una nivelación de precisión. En caso de que se suponga o identifique alguna conexión entre el acuífero y los cuerpos o cursos de agua superficial, es conveniente obtener muestras de agua para su análisis químico, con objeto de confirmar la interconexión y definir en qué forma se relaciona la calidad de agua. Las mediciones piezométricas y las pruebas de bombeo en pozos que operan en la zona proporcionan datos adicionales de gran utilidad.

2.2. MÉTODOS DE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

A medida que el grado de dificultad para encontrar el agua subterránea aumenta y los costos de perforación se incrementan, los métodos indirectos de exploración que permiten detectar la presencia del agua desde la superficie se hacen indispensables. Desde hace algunos años, en las campañas de prospección geohidrológica se han utilizado métodos indirectos de exploración geofísica. También se utilizan los sensores remotos, capaces de medir alguna propiedad física de un objetivo determinado a una distancia considerable de este.

Se han desarrollado varios métodos geofísicos de exploración de diferente tipo. Los más utilizados en la prospección geohidrológica son los métodos geoeléctricos y los geosísmicos, debido

Ilustración 2.6 Formato para levantamiento de pozos

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|------------------------------|-------------------|---------------------------------|-----------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------|--|--------------------------------------|--|----------------------------|--------------------|-------------------|----------------|-------------------|------------------|-------------------|-----------------|-------------------|------------------|-------------------|-----------------|-------------------|------------|-------------------|--------------|-------------------|----------------|-------------|------------|-----------------|-------------------------|------------------|------------------|-------------|--------------|--|---------------|----------------|--|--|---------------------------------|---------------------|-------|--|--|--|--------------|-----------------|------------------|----------------|------------|--|----------------|-----------------|------------------|--|----------------------------|---------|------------------|-------------|---------------------------|---------|------------------|-------------|---------------|-----------------|--------------------------|------------|--|-----------------------|--|--|---------------|---|--|--|--|---|--|--|--|------------------------|--|--|-------------------|----------|--------------|--|------------------------|-------------|----------------------|----------------|--|---------------------------|--------------------------------------|--|----------------------|---------------------------------|----------------------------|---|--|---|--|-------------|-------------------|---------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|---------------------------|------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------|------------------------------------|--------------|-------------------------|--|------------------------------------|
| <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 5px;"> CENSO DE APROVECHAMIENTO DE AGUA SUBTERRANEA </div> <table style="width: 100%; border: 1px solid black; margin-top: 5px;"> <tr> <td style="width: 50%;">Estado _____</td> <td style="width: 50%;">No. De aprovechamiento _____</td> </tr> <tr> <td>Municipio _____</td> <td>Fecha de perforacion _____</td> </tr> <tr> <td>Localidad _____</td> <td>Zona de estudio _____</td> </tr> <tr> <td>Propietario _____</td> <td>Zona de geohidraulica _____</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Cuenca no. _____ Subcuenca no. _____</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Elevacion del brocal _____</td> </tr> </table> <table style="width: 100%; border: 1px solid black; margin-top: 5px;"> <tr> <td>Medidor total de f</td> <td>Si _____ No _____</td> <td>Prueba de afor</td> <td>Si _____ No _____</td> </tr> <tr> <td>Prueba de bombeo</td> <td>Si _____ No _____</td> <td>Corte geologico</td> <td>Si _____ No _____</td> </tr> <tr> <td>Análisis de agua</td> <td>Si _____ No _____</td> <td>Registro electr</td> <td>Si _____ No _____</td> </tr> <tr> <td>Con equipo</td> <td>Si _____ No _____</td> <td>Zona de veda</td> <td>Si _____ No _____</td> </tr> </table> <table style="width: 100%; border: 1px solid black; margin-top: 5px;"> <tr> <td>Tipo de aprov:</td> <td>Noria _____</td> <td>Pozo _____</td> <td>Manantial _____</td> <td>Galeria filtrante _____</td> </tr> <tr> <td>calidad del agua</td> <td>Cristalina _____</td> <td>Zarca _____</td> <td>Turbia _____</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Conductividad</td> <td colspan="3">_____ mmhos/cm</td> <td>Operación act _____ Inact _____</td> </tr> <tr> <td>Caudal de operación</td> <td colspan="4">_____</td> </tr> <tr> <td>Uso del agua</td> <td>Doméstico _____</td> <td>Industrial _____</td> <td>Agrícola _____</td> <td>Otro _____</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Ganadero _____</td> <td>Municipal _____</td> <td>Recreativo _____</td> <td></td> </tr> </table> <table style="width: 100%; border: 1px solid black; margin-top: 5px;"> <tr> <td>Niveles iniciales estatico</td> <td>_____ m</td> <td>Dinamico _____ m</td> <td>Fecha _____</td> </tr> <tr> <td>Niveles actuales estatico</td> <td>_____ m</td> <td>Dinamico _____ m</td> <td>Fecha _____</td> </tr> <tr> <td>Tipo de motor</td> <td>Electrico _____</td> <td>Combustion interna _____</td> <td>Aire _____</td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="3">Traccion animal _____</td> </tr> <tr> <td>Tipo de bomba</td> <td colspan="3">Pozo profundo lubricado con agua sumergible _____</td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="3">Pozo profundo lubricado con aceite centrifuga _____</td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="3">Piston bimbolete _____</td> </tr> <tr> <td>Potencia de motor</td> <td>_____ HP</td> <td>A: _____ RPM</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Tipo de descarga libre</td> <td>Mixto _____</td> <td>Tanque elevado _____</td> <td>A la red _____</td> </tr> </table> | Estado _____ | No. De aprovechamiento _____ | Municipio _____ | Fecha de perforacion _____ | Localidad _____ | Zona de estudio _____ | Propietario _____ | Zona de geohidraulica _____ | | Cuenca no. _____ Subcuenca no. _____ | | Elevacion del brocal _____ | Medidor total de f | Si _____ No _____ | Prueba de afor | Si _____ No _____ | Prueba de bombeo | Si _____ No _____ | Corte geologico | Si _____ No _____ | Análisis de agua | Si _____ No _____ | Registro electr | Si _____ No _____ | Con equipo | Si _____ No _____ | Zona de veda | Si _____ No _____ | Tipo de aprov: | Noria _____ | Pozo _____ | Manantial _____ | Galeria filtrante _____ | calidad del agua | Cristalina _____ | Zarca _____ | Turbia _____ | | Conductividad | _____ mmhos/cm | | | Operación act _____ Inact _____ | Caudal de operación | _____ | | | | Uso del agua | Doméstico _____ | Industrial _____ | Agrícola _____ | Otro _____ | | Ganadero _____ | Municipal _____ | Recreativo _____ | | Niveles iniciales estatico | _____ m | Dinamico _____ m | Fecha _____ | Niveles actuales estatico | _____ m | Dinamico _____ m | Fecha _____ | Tipo de motor | Electrico _____ | Combustion interna _____ | Aire _____ | | Traccion animal _____ | | | Tipo de bomba | Pozo profundo lubricado con agua sumergible _____ | | | | Pozo profundo lubricado con aceite centrifuga _____ | | | | Piston bimbolete _____ | | | Potencia de motor | _____ HP | A: _____ RPM | | Tipo de descarga libre | Mixto _____ | Tanque elevado _____ | A la red _____ | <div style="text-align: center;"> </div> <table style="width: 100%; border: 1px solid black; margin-top: 5px;"> <tr> <td>Profundidad total _____ m</td> <td>Longitud de tubería ranurada _____ m</td> </tr> <tr> <td>Profundidad de la cámara de bombeo _____ m</td> <td>DE _____ m A _____ m</td> </tr> <tr> <td>Diametro de perforacion _____ m</td> <td>Diametro del ademe _____ m</td> </tr> <tr> <td>Longitud de la columna de succión _____ m</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Diametro de la columna de succión _____ m</td> <td></td> </tr> </table> <table style="width: 100%; border: 1px solid black; margin-top: 5px;"> <tr> <td>Pozo piloto</td> <td>SI _____ NO _____</td> <td>Pozo de observacion</td> <td>SI _____ NO _____</td> </tr> <tr> <td>Muestra de agua</td> <td>SI _____ NO _____</td> <td>Prueba de bomba</td> <td>SI _____ NO _____</td> </tr> </table> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;"> IDROMETRI </div> <table style="width: 100%; margin-top: 5px;"> <tr> <td>Horas de bombeo _____ hrs</td> <td>Dias _____</td> </tr> <tr> <td>Numero de habitantes servidos _____</td> <td>Volumen anual _____ m³</td> </tr> <tr> <td>Cultivo _____</td> <td>Volumen anual _____ m³</td> </tr> <tr> <td>Ganado _____</td> <td>Numero de cabezas _____</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Volumen anual _____ m³</td> </tr> </table> <p style="margin-top: 10px;">Responsable de la informacion _____</p> <p>Fecha del censo _____</p> <p>Verificio _____</p> <p>Dependencia o empresa informante _____</p> <p>Fecha de terminacion del pozo _____</p> | Profundidad total _____ m | Longitud de tubería ranurada _____ m | Profundidad de la cámara de bombeo _____ m | DE _____ m A _____ m | Diametro de perforacion _____ m | Diametro del ademe _____ m | Longitud de la columna de succión _____ m | | Diametro de la columna de succión _____ m | | Pozo piloto | SI _____ NO _____ | Pozo de observacion | SI _____ NO _____ | Muestra de agua | SI _____ NO _____ | Prueba de bomba | SI _____ NO _____ | Horas de bombeo _____ hrs | Dias _____ | Numero de habitantes servidos _____ | Volumen anual _____ m ³ | Cultivo _____ | Volumen anual _____ m ³ | Ganado _____ | Numero de cabezas _____ | | Volumen anual _____ m ³ |
| Estado _____ | No. De aprovechamiento _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Municipio _____ | Fecha de perforacion _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Localidad _____ | Zona de estudio _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Propietario _____ | Zona de geohidraulica _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Cuenca no. _____ Subcuenca no. _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Elevacion del brocal _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Medidor total de f | Si _____ No _____ | Prueba de afor | Si _____ No _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Prueba de bombeo | Si _____ No _____ | Corte geologico | Si _____ No _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Análisis de agua | Si _____ No _____ | Registro electr | Si _____ No _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Con equipo | Si _____ No _____ | Zona de veda | Si _____ No _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Tipo de aprov: | Noria _____ | Pozo _____ | Manantial _____ | Galeria filtrante _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| calidad del agua | Cristalina _____ | Zarca _____ | Turbia _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Conductividad | _____ mmhos/cm | | | Operación act _____ Inact _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Caudal de operación | _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Uso del agua | Doméstico _____ | Industrial _____ | Agrícola _____ | Otro _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Ganadero _____ | Municipal _____ | Recreativo _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Niveles iniciales estatico | _____ m | Dinamico _____ m | Fecha _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Niveles actuales estatico | _____ m | Dinamico _____ m | Fecha _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Tipo de motor | Electrico _____ | Combustion interna _____ | Aire _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Traccion animal _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Tipo de bomba | Pozo profundo lubricado con agua sumergible _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Pozo profundo lubricado con aceite centrifuga _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Piston bimbolete _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Potencia de motor | _____ HP | A: _____ RPM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Tipo de descarga libre | Mixto _____ | Tanque elevado _____ | A la red _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Profundidad total _____ m | Longitud de tubería ranurada _____ m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Profundidad de la cámara de bombeo _____ m | DE _____ m A _____ m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Diametro de perforacion _____ m | Diametro del ademe _____ m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Longitud de la columna de succión _____ m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Diametro de la columna de succión _____ m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pozo piloto | SI _____ NO _____ | Pozo de observacion | SI _____ NO _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Muestra de agua | SI _____ NO _____ | Prueba de bomba | SI _____ NO _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Horas de bombeo _____ hrs | Dias _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Numero de habitantes servidos _____ | Volumen anual _____ m ³ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cultivo _____ | Volumen anual _____ m ³ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ganado _____ | Numero de cabezas _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Volumen anual _____ m ³ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Hoja 1

Hoja 2

a la calidad de sus resultados y a los bajos costos de aplicación.

2.2.1. MÉTODOS GEOELÉCTRICOS

Los métodos de prospección geoelectrica responden a los dos criterios siguientes:

- Utilizan el paso de una corriente natural o artificial por el terreno
- No hacen intervenir campos magnéticos

Estos métodos son muchos y variados y pueden clasificarse de la siguiente forma:

Métodos que utilizan corrientes naturales

- Método de polarización espontánea
- Método magnetoteléurico

Métodos que utilizan corrientes artificiales

- Método de las equipotenciales
- Método de las relaciones de caída de potencial
- Método de resistividad
- Método de polarización inducida

Entre estos métodos, el de resistividad es el más empleado en la hidrogeología.

2.2.1.1. Método de resistividad

Este método, al igual que los otros métodos geoeléctricos, se basa en la medición de la resistividad, conductividad longitudinal y la resistencia transversal que caracterizan a las rocas y a las capas geológicas.

La conductividad eléctrica (propiedad de conducir la corriente eléctrica) varía grandemente de una roca a otra. Los parámetros que representan esta propiedad son: la conductividad o su inversa, la resistividad.

La resistividad se define como la resistencia de un cilindro de longitud y sección unitarias.

$$\rho = R \left[\frac{s}{L} \right] \quad \text{Ecuación 2.1}$$

donde:

ρ = Resistividad

R = Resistencia

L = Longitud

s = Sección

De esta relación se deduce que la resistividad se expresa en ohm m²/m, el ohm-m es una abreviación que se emplea en este libro.

La conductividad en las rocas puede ser metálica o electrolítica. La conductividad metálica se caracteriza por el transporte de electrones en la matriz de la roca; es el caso de algunas minas metálicas y esquistos grafitosos. La conductividad electrolítica se debe al desplazamiento de los iones contenidos en el agua de imbibición de la roca y es el tipo de conductividad que se presenta en la mayoría de las rocas.

La resistividad de las rocas saturadas que tienen conductividad electrolítica es función decreciente de:

- La porosidad total comunicante, donde el agua contenida en receptáculos aislados no ofrece ninguna influencia
- La conductividad del agua de imbibición

La resistividad también depende de la distribución y la forma de poros y fisuras. En rocas estratificadas, la resistividad varía con la dirección de la corriente. Los valores mínimo y máximo corresponden respectivamente, a la dirección de la corriente, es decir, cuando circula paralela o perpendicularmente a la estratificación. La relación entre estos dos valores extremos llega a ser de algunas unidades. Las rocas en que sucede este fenómeno se llaman anisótropas. Se trata de una micro o macroanisotropía según que el espesor de los estratos sea de algunos milímetros (caso de gneis, por ejemplo) o de algunas decenas de centímetros (caso de alternancia de areniscas lutitas, por ejemplo).

La resistividad del agua de imbibición de las rocas disminuye cuando aumenta la cantidad de sales disueltas o con la temperatura. También depende de la naturaleza de las sales disueltas.

La Tabla 2.2 muestra el orden de magnitud de la resistividad para algunos tipos de agua y para las rocas más comunes.

La conductividad longitudinal S y la resistencia transversal T de una capa son respectivamente iguales al cociente y al producto de su espesor por su resistividad.

$$S = \frac{e}{\rho} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

$$T = e - \rho \quad \text{Ecuación 2.3}$$

La primera se expresa en ohms. La segunda en ohm - m². La conductividad longitudinal y

Tabla 2.2 Orden de magnitud de la resistividad para algunos tipos de agua y para rocas comunes

| Agua y rocas | Resistividad (ohm-m) |
|----------------------------------|----------------------|
| Agua de mar | 0.2 |
| Agua de acuífero aluvial | 10-30 |
| Agua de manantiales | 50-100 |
| Arena y gravas secas | 1 000-10 000 |
| Arena y gravas con agua dulce | 50-500 |
| Arena y gravas con agua salada | 0.5-5 |
| Arcillas | 02-20 |
| Margas | 20-100 |
| Calizas | 300-10 000 |
| Arenisca arcillosa | 50-300 |
| Cuarcitas | 300-10 000 |
| Tobas volcánicas | 20-100 |
| Lavas | 300-10 000 |
| Esquistos grafitosos | 0.5-5 |
| Esquistos arcillosos o alterados | 100-300 |
| Esquistos sanos | 300-3 000 |
| Gneis, granito alterado | 100-1 000 |
| Gneis, granito sano | 1 000-10 000 |

la resistencia transversal se conocen también como parámetros de Dar Zarrouk. De estos conceptos se desprende el teorema general de la equivalencia y el principio de supresión, los cuales son de importancia fundamental en la interpretación de sondeos eléctricos verticales.

El teorema general de la equivalencia se aplica a un terreno formado por capas paralelas anisótropas entre una y otra. Cada capa puede estar afectada por una conductividad perpendicular y paralela a la estratificación. La corriente eléctrica circula en las capas conductoras, paralelamente a la estratificación y en las capas resistentes perpendicular a esta.

De lo anterior se establece que:

- Una capa conductora delgada situada entre dos terrenos resistentes es definida por la relación espesor-resistividad.

Esto implica que, sin modificar la distribución de la corriente eléctrica, la capa conductora puede ser reemplazada por una capa equivalente tal, que la conductancia de la capa sea constante

$$\frac{e}{p} = cte \quad \text{Ecuación 2.4}$$

- Una capa resistente delgada situada entre dos terrenos conductores se define por el producto espesor/resistividad. Por lo que, sin modificar la distribución de la corriente eléctrica, esta capa puede ser reemplazada por una capa equivalente tal, que su resistencia transversal sea constante

$$e p = cte \quad \text{Ecuación 2.5}$$

El principio de supresión se aplica si una capa delgada está situada entre dos terrenos, uno resistente y el otro conductor. La curva de los sondeos eléctricos realizados en el terreno será idéntica a la de una curva de dos capas, eliminando así la capa intermedia.

Debido a estos dos principios, la prospección geoelectrica debe ser calibrada con algún otro método de prospección directa como la perforación. Sin esta, la interpretación de los sondeos puede alejarse mucho de la realidad.

Se puede medir la distribución de las resistividades de varias formas. Por un lado están los métodos usuales de corriente continua conocidos como sondeos eléctricos verticales y calicatas eléctricas; por otro lado, están los métodos electromagnéticos, de los cuales los sondeos por transitorio electromagnético y los sondeos magnetotelúricos son los más utilizados en la prospección geohidrológica. También se trabaja con las calicatas y los pseudosondeos electromagnéticos aéreos, que pueden ser muy útiles en la evaluación de acuíferos grandes poco profundos.

Cada uno de los métodos tiene sus propias características de operación e interpretación que los hace aplicables en determinadas exploraciones, dependiendo de factores como la profundidad esperada del acuífero, la extensión de este, la topografía de la zona de estudio, la vegetación, la salinidad del acuífero, el tiempo de la prospección y la economía del proyecto, entre otros.

2.3. EMPLAZAMIENTO DE POZOS

Dentro de la hidrogeología y de la ingeniería, el pozo es una obra que tiene gran importancia práctica, ya sea como exploración directa o como captación de agua subterránea.

A pesar del gran desarrollo de las técnicas indirectas de prospección geohidrológica, el pozo exploratorio sigue siendo insustituible como fuente directa de información acerca del subsuelo. Es

el único método que puede proporcionar datos precisos acerca de la secuencia estratigráfica, la litología y las características hidrogeológicas de las rocas, así como los niveles y la calidad del agua subterránea. Además, aporta la información necesaria para traducir los resultados de los métodos geofísicos a términos hidrogeológicos.

Como obra de captación, el pozo de bombeo es, con mucho, la más común. Es el corazón de la mayoría de los sistemas que abastecen los núcleos de población, desde las pequeñas comunidades rurales, hasta las gigantescas metrópolis. Mediante los pozos se suministra agua a las grandes zonas de riego por bombeo y a la mayoría de los desarrollos industriales.

Dada su importancia y su creciente costo de construcción, de equipamiento, de operación y de mantenimiento, es de primordial importancia seleccionar el emplazamiento adecuado de los pozos para que se cumplan satisfactoriamente los objetivos con el menor costo posible.

La localización de los pozos exploratorios se fija dependiendo de los datos específicos que se requieren para conocer el marco hidrogeológico subterráneo. Generalmente, para su localización interesa definir la secuencia estratigráfica, la ubicación, litología, dimensiones y características hidráulicas de los acuíferos, la posición del nivel freático, la distribución vertical de la carga hidráulica, las características fisicoquímicas del agua, su distribución espacial y la conexión del acuífero con algún curso o cuerpo de agua superficial. No es posible garantizar *a priori* el éxito de una captación en un sitio dado, aun cuando se disponga de estudios previos. Por ello, la práctica común consiste en perforar el agujero exploratorio para obtener los registros indicados y con base en ellos diseñar la terminación del pozo. Para captaciones de agua, los factores más impor-

tantes a considerar en la selección de la localización de los pozos son:

- Las características del acuífero
- La profundidad del nivel estático
- La calidad del agua

Dentro de las características hidráulicas del acuífero, la transmisividad es la de mayor interés, ya que principalmente de ella depende el rendimiento de los acuíferos.

La profundidad del nivel estático es uno de los factores que determinan el costo del bombeo. La selección del emplazamiento de pozos con otros fines, como el drenaje vertical de terrenos, la recarga artificial de acuíferos o la inyección de fluidos contaminantes al subsuelo, es un tema no considerado en el presente libro, aunque se basa en criterios similares a los aportado.



3

CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

3.1. CALIDAD NATURAL

Las características fisicoquímicas naturales del agua están determinadas por dos tipos de procesos fundamentales: los procesos relacionados con el comportamiento de minerales y elementos metálicos en un medio acuoso y los procesos relacionados con la influencia del medio ambiente. En el presente libro se tratan únicamente estos últimos.

Entre los factores ambientales dominantes se encuentra el clima, que actúa de diversas formas. Influye en la meteorización de las rocas y en la formación de suelos. También controla las características de la cobertura vegetal y, en consecuencia, determina la composición química del agua que fluye superficial y subterráneamente.

Algunos de los constituyentes mayores, como el bicarbonato, el sulfato y el cloruro, son los más afectados por los efectos climáticos. El bicarbonato, por ejemplo, predomina en regiones de climas húmedos, templados o cálidos, donde prolifera la vegetación. El escurrimiento originado en los bosques tropicales suele tener baja concentración de sales disueltas. En las zonas áridas en cambio, la concentración de elemen-

tos solubles por evaporación da lugar a altas concentraciones de sales en el agua.

La fuente principal de los elementos disueltos en el agua subterránea es la corteza terrestre. La composición mineralógica, textura y estructura de las rocas, determinan la composición química del agua que circula a través de ellas. Generalmente, la concentración de sales en el agua subterránea es mayor que en la superficial, debido a que aquella permanece mucho más tiempo en contacto con las rocas.

Como la temperatura de las rocas aumenta con la profundidad, el agua que circula en estratos profundos se encuentra más caliente que cuando fluye cerca de la superficie. Puesto que la temperatura elevada incrementa la solubilidad de los minerales, la concentración de sales en las aguas termales profundas suele ser mucho mayor que en las aguas someras. La elevada salinidad de algunos manantiales termales localizados en la Faja Neovolcánica Transmexicana, es un ejemplo de lo anterior.

Las características químicas del agua también son controladas por factores bioquímicos relacionados con los procesos vitales de plantas y animales. En este sentido, la composición natural del agua tiene

estrecha relación con la ecología, ya que en aquella influyen numerosos factores y procesos de los ecosistemas, como la fotosíntesis, el metabolismo de los seres vivos, las reacciones químicas, etc. Sin embargo, en el caso particular del agua subterránea, la influencia de estos factores es mucho menor, dado que la actividad biológica en el subsuelo es menos importante que en la superficie.

El movimiento del agua es otro factor importante que determina su composición natural, ya que prácticamente toda ella se encuentra en continua circulación dentro del ciclo hidrológico. Este aspecto es especialmente importante en el caso de las aguas subterráneas, pues su larga permanencia en contacto con las rocas propicia diversos procesos y reacciones químicas que se traducen en sales disueltas y que pueden afectar su aptitud para diferentes usos.

3.2. MUESTREO DE AGUA SUBTERRÁNEA

La composición del agua se determina por medios físicos y químicos mediante la colección y el análisis de muestras. Tradicionalmente, la práctica consistía en la toma de muestras en el campo para su análisis posterior en laboratorio. Sin embargo, el gran desarrollo de la tecnología permite ahora el muestreo automático, la medición continua, el almacenamiento y la transmisión de datos o el análisis *in situ* del agua.

3.2.1. MUESTREO

El muestreo representa una parte vital de todo estudio de calidad del agua y probablemente es la mayor fuente de error en el desarrollo del mismo.

Como en cualquier tipo de estudio basado en el examen de muestras pequeñas, en su relación con el tamaño total de un objeto heterogéneo, hay incertidumbre debido a la posibilidad de error en el muestreo. Por ello debe destacarse la necesidad de diseñar adecuadamente el programa de muestreo, el número, tamaño y forma de colección, de tal manera que las muestras sean representativas de la masa de agua en cuestión.

Un conjunto de muestras ampliamente distribuidas es más representativo de las características de la masa de agua investigada, que una muestra puntual. Cuanto mayor sea el número de muestras, tanto más completa será la descripción de las características de la fuente de agua. Sin embargo, ese número es limitado por razones económicas y prácticas. Por consiguiente, los programas de muestreo deben conciliar su nivel de representatividad, con su costo.

Los estudios de la calidad del agua subterránea deben tener dos objetivos generales. El primero es proporcionar información representativa de la composición química de la masa de agua. El segundo, aportar información acerca de la variación de esas características en el tiempo, y todo ello al menor costo posible. Adicionalmente, los propósitos específicos del estudio en cuestión deben ser claramente establecidos.

Varios de los factores físicos que propician la mezcla en los cuerpos de agua superficial, o no se presentan, o son menos efectivos en los sistemas de agua subterránea. El movimiento del agua en la zona saturada suele ser muy lento y, generalmente, la permeabilidad horizontal es varias veces mayor que la permeabilidad vertical. Por ello, las características químicas del agua pueden variar de un estrato a otro. Por lo

tanto, el método de muestreo debe tender al conocimiento de la variación de las características del agua en sentido horizontal y vertical.

Comúnmente los pozos de bombeo son puntos obligados de muestreo de agua subterránea. Sin embargo, se debe destacar que tienen serias limitaciones. En general, captan agua de diferente calidad procedente de varios estratos y la mezclan en su interior. Así, el agua muestreada en ellos es una media de su composición en toda la sección vertical captada, pero solo es representativa si las características químicas de la masa de agua subterránea son relativamente homogéneas.

A pesar de tales limitaciones, la utilización de pozos de bombeo en los programas de muestreo es casi siempre inevitable, dado el alto costo de construcción de los pozos de monitoreo. Cuando se trata de investigar la distribución de cierto tipo de contaminantes en un acuífero, el muestreo de agua en pozos de bombeo puede ser prácticamente inaceptable. Por el contrario, en otro tipo de estudios, como los de hidrogeoquímica, el muestreo en ellos puede ser adecuado.

La calidad del agua extraída por algunos pozos puede variar con el tiempo, respondiendo a cambios en su caudal de bombeo o a fluctuaciones regionales de los niveles piezométricos. En otros casos, como en los acuíferos costeros, es controlada por la variación vertical de su composición química. Los registros eléctricos en pozos y los sondeos geofísicos de resistividad pueden aportar valiosa información acerca de la distribución vertical de la calidad del agua, la cual debe ser interpretada conjuntamente con los resultados de los análisis químicos.

Cuando un pozo penetra en un acuífero de gran tamaño y relativamente homogéneo, la composición del agua no cambia mucho a largo plazo. En este sentido, se deben considerar los acuíferos como depósitos y no como conductos. Este enfoque es adecuado cuando se trata de acuíferos en los que el agua fluye a través de fracturas grandes.

Debido a la lentitud del flujo subterráneo, los cambios en la calidad del agua subterránea pueden ser detectados mediante muestras colectadas con una frecuencia mensual, estacional o anual.

Con el desarrollo tecnológico en materia de monitoreo, ahora es posible instalar dispositivos computarizados para el registro continuo de las variaciones de algunos parámetros fisicoquímicos. Los datos así obtenidos son de gran utilidad para complementar los estudios basados en los análisis de muestras de agua subterránea.

El programa de monitoreo debe diseñarse tomando en cuenta principalmente los objetivos del estudio, la información básica disponible y las características y complejidad hidrogeológica de la zona de interés, independientemente de las limitaciones económicas.

La experiencia del personal técnico responsable del estudio es factor decisivo para reducir tanto el programa de campo como el de laboratorio y alcanzar los objetivos prefijados. Frecuentemente, el costo y el tiempo de la investigación pueden ser substancialmente disminuidos mediante un programa racional de monitoreo y una selección adecuada de los parámetros más significativos, descartando determinaciones innecesarias que a menudo son realizadas por costumbre.

3.2.2. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA COMPOSICIÓN DEL AGUA

El análisis de laboratorio para determinar los componentes disueltos en el agua, es una de las partes fundamentales de todo estudio relativo a la calidad del agua. En este libro no se describen los procedimientos de laboratorio, únicamente se hace referencia a la representación e interpretación de los resultados de los análisis.

La mayoría de las sales inorgánicas disueltas en el agua están disociadas en iones, que son partículas eléctricamente cargadas. Se les denominan cationes o aniones, según su carga sea positiva o negativa, respectivamente. Los análisis químicos del agua generalmente se expresan en términos de concentraciones iónicas.

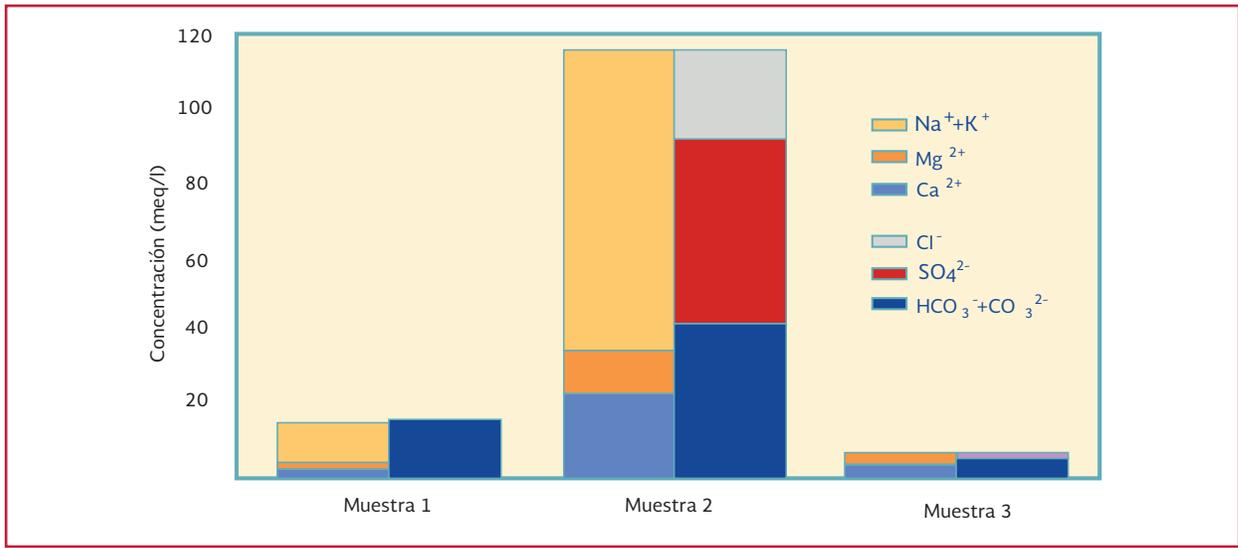
En estudios de la calidad del agua subterránea, las determinaciones comunes se refieren a los cationes calcio, magnesio, sodio y potasio, y a los aniones sulfato, cloruro, carbonato, bicarbonato y nitrato. Adicionalmente se determinan ciertas propiedades como la temperatura, la dureza, el color, la conductividad eléctrica, los sólidos totales disueltos, la demanda de oxígeno y la relación de absorción de sodio, entre otras. Algunos análisis consideran constituyentes menores cuando su presencia puede generar problemas relacionados con el uso del agua o también en casos de estudios con propósitos específicos, como los hidrogeoquímicos, los estudios de contaminación o de hidrología isotópica. En este caso se encuentran elementos como boro, hierro, manganeso y fósforo, los metales pesados como cadmio, cobre, cromo, mercurio, plomo y zinc, los no metales como arsénico y selenio, los hidrocarburos y los compuestos orgánicos, y los isótopos deuterio, oxígeno 18 y tritio.

Para la representación de resultados de análisis de laboratorio se utilizan gráficas o diagramas que faciliten la correlación y comparación de las características del agua muestreada en diferentes sitios o en el mismo sitio a lo largo del tiempo. Además de las gráficas diseñadas con fines comparativos y descriptivos, hay otras orientadas a identificar mezclas entre aguas procedentes de diversas fuentes o procesos químicos que afectan al agua a lo largo de su curso subterráneo.

Entre las representaciones gráficas más comunes, se encuentran los diagramas de concentración iónica que muestran el contenido total de sales y su distribución entre los principales iones, para uno o varios análisis. Uno de los diagramas más utilizados es el propuesto por Collins, en el cual la distribución iónica es representada mediante dos barras verticales, cuya dimensión vertical es proporcional a la concentración de aniones o cationes, expresada en miliequivalentes por litro (meq/L). En una de las barras se muestra el contenido de aniones (derecha), y en la otra, el de cationes (izquierda) (Ilustración 3.1).

Otro método empleado con frecuencia es el de Stiff, que consiste en cuatro ejes horizontales paralelos que se extienden a ambos lados de un eje vertical. A escala prefijada, en meq/L, las concentraciones de los cationes principales se representan una en cada eje horizontal, a la izquierda del eje vertical. De la misma manera, las concentraciones de los cuatro aniones principales son representadas a la derecha del eje vertical. Los puntos resultantes son unidos por una poligonal, cuya forma, permite identificar diferencias o semejanzas entre la composición de muestras

Ilustración 3.1 Diagrama de Collins



de agua y cuya área inscrita es proporcional a la salinidad total (Ilustración 3.2).

En el diagrama circular seccionado, el radio del círculo representa, a cierta escala, la concentración total, y los sectores del mismo representan el contenido de iones analizados (Ilustración 3.3).

Los sistemas trilineales se utilizan para representar la composición química del agua en términos de tres grupos aniónicos y tres grupos catiónicos. Los valores son expresados como porcentajes de la suma de aniones o de cationes. En los métodos propuestos por Hill y Piper se utilizan dos triángulos, uno para los aniones y otro para los cationes. En cada uno de sus lados se representa un ion o un grupo de iones.

La composición del agua es representada por dos puntos, uno en cada triángulo. En un rombo colocado sobre los triángulos y alineado con ellos, se proyectan los puntos representativos de la composición catiónica y aniónica, resultando en un solo punto (Ilustración 3.4).

3.3. NORMAS DE CALIDAD

Las normas de calidad del agua subterránea determinan los contenidos permisibles de sus componentes físicos, químicos o bacteriológicos, disueltos y en suspensión, según el uso a que se va a destinar. Diversos organismos internacionales, como la Organización Mundial de la Salud y la Organización Panamericana de la Salud, han establecido normas de calidad de vigencia general, las cuales han sido adoptadas por muchos países, con algunos ajustes basados en sus condiciones socioeconómicas particulares.

Con este propósito, se suelen diferenciar tres usos principales: el municipal, el agrícola y el industrial. Las normas correspondientes al primero se pueden dividir en primarias y secundarias. Las primeras se refieren al agua para consumo humano y están basadas en la toxicidad de sus componentes disueltos, conforme a criterios estéticos o de salud pública. Las normas secundarias establecen las condiciones que deben cumplir las aguas residuales para evitar daños al medio ambiente.

Ilustración 3.2 Diagrama de Stiff

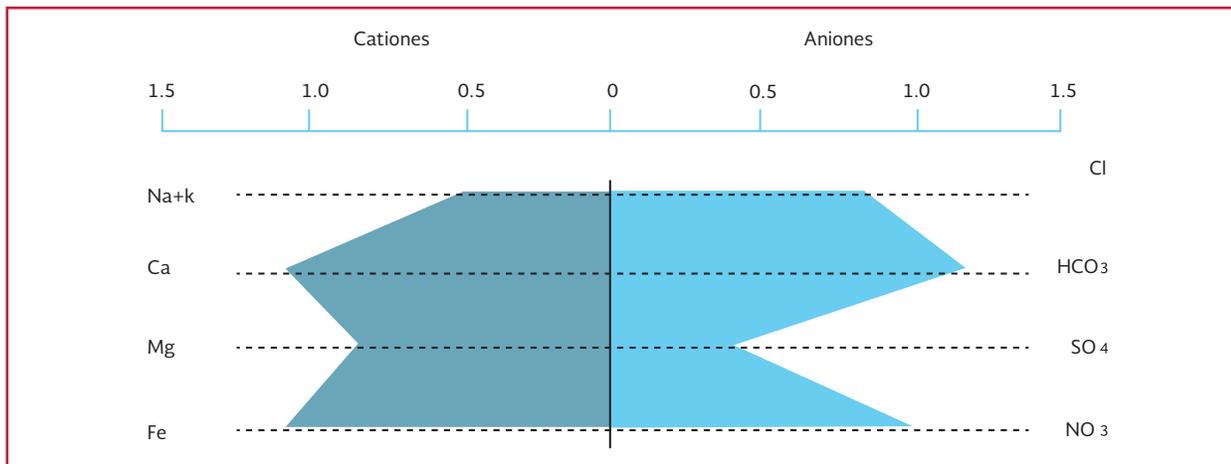
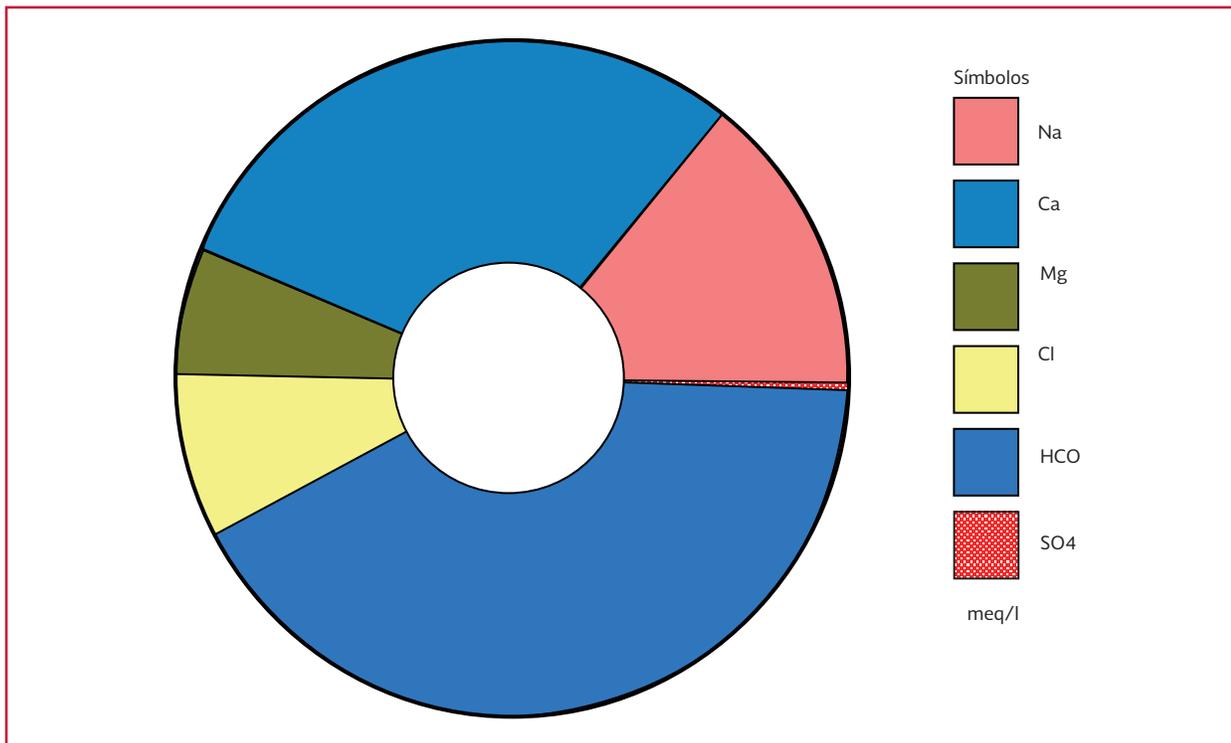


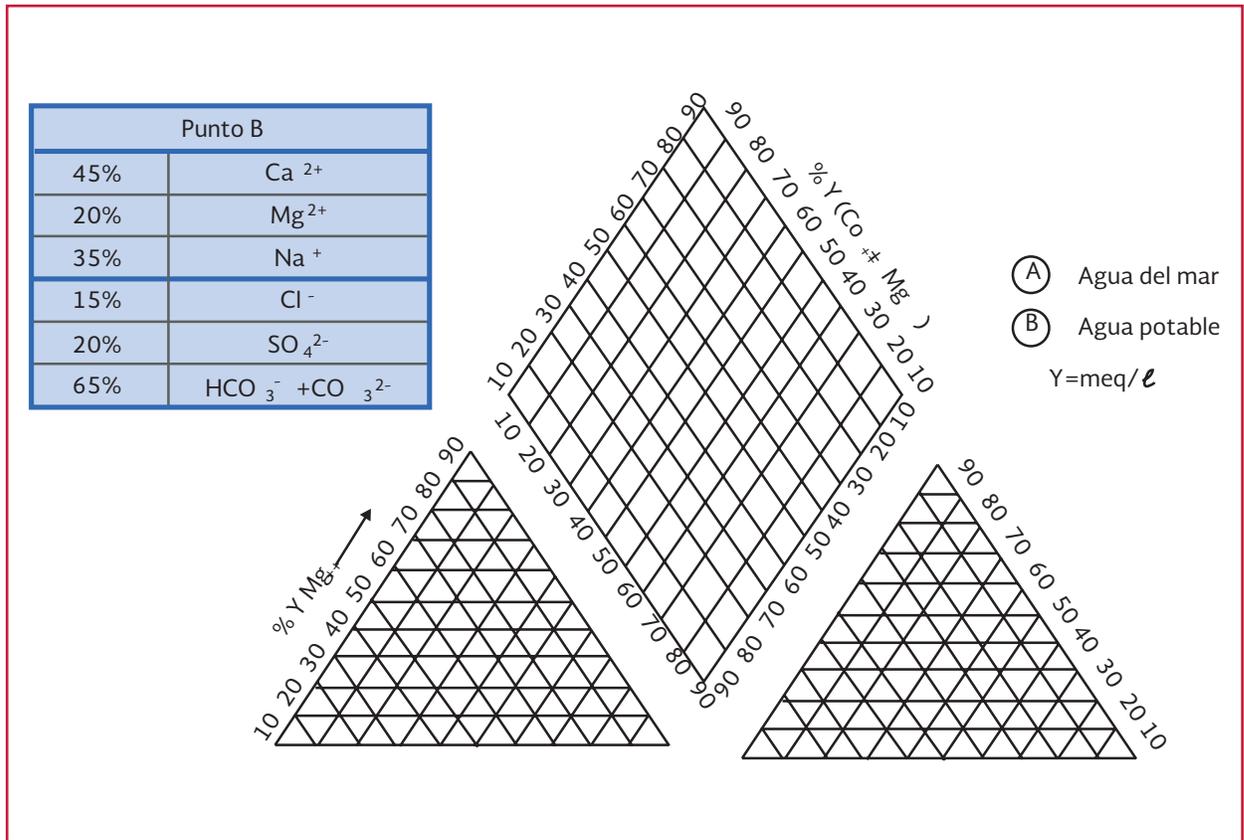
Ilustración 3.3 Diagrama circular seccionado



Las normas para el uso agropecuario también incluyen dos grupos, el agrícola y el pecuario. La aptitud del agua subterránea para el riego depende del cultivo particular y de las características del suelo. Para uso pecuario, las normas son menos exigentes que para consumo humano, aunque también hay notables diferencias en el agua aceptada por los diferentes tipos de ganado.

En general, los procesos industriales requieren agua de menor calidad, aunque las normas relativas a este uso también son variables. Algunas industrias requieren agua de composición química uniforme, ya que si presenta fluctuaciones amplias y continuas, se propicia la precipitación de algunos minerales y su incrustación en las instalaciones como las tuberías y las calderas.

Ilustración 3.4 Diagrama de Piper-Hill-Langer



Por esta razón, el agua rica en carbonato, magnesio, sulfato y calcio, suele ser inconveniente para uso industrial.

3.4. HIDROGEOQUÍMICA

La hidrogeoquímica aporta valiosa información acerca de los sistemas geohidrológicos, a partir de la interpretación de las variaciones espaciales y temporales de las características fisicoquímicas del agua subterránea, en relación con el marco físico en que se mueve.

En su recorrido por el ciclo hidrológico, las características fisicoquímicas del agua varían a causa de su reacción con el medio ambiente. El agua meteórica y la que escurre en forma natural tiene baja concentración de sales disueltas

debido a su rápido paso por la atmósfera y sobre la superficie del terreno.

3.4.1. ORIGEN DE LOS ELEMENTOS Y SUSTANCIAS DISUELTAS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA

A partir del momento en que se infiltra, el agua reacciona químicamente con el suelo y las rocas subyacentes tomando en solución algunas de sus componentes. Así, su salinidad va aumentando a lo largo de su trayectoria. Debido a ello, la composición química refleja, en parte, el marco geológico a través del cual circula.

La concentración de los componentes disueltos en el agua depende, principalmente, del tiempo

que permanece en contacto con las rocas aportadoras. Generalmente, cuanto más prolongado es el contacto, tanto mayor es la salinidad total o la concentración de un elemento específico. A su vez, el tiempo en contacto depende de la velocidad de flujo del agua y de la distancia recorrida por la misma.

Cuanto más profunda se encuentra el agua en su curso descendente, tanto mayor es la distancia recorrida por ella en el subsuelo y su permanencia entre las rocas. El agua presente a unos cuantos cientos de metros de la superficie del terreno, ha permanecido cientos o hasta miles de años en el subsuelo, desde el momento en que se infiltró (Ilustración 3.5).

Debido a lo anterior, la salinidad del agua suele aumentar con la profundidad. A esto contribuye también el hecho de que conforme aumenta la profundidad, las condiciones químicas (menor pH y contenido de oxígeno) favorecen más la solución de algunos componentes de las rocas.

Los cationes disueltos en el agua subterránea proceden principalmente de los componentes solubles de las rocas. En cambio, los aniones son aportados principalmente por fuentes no litológicas. Por ejemplo, el bicarbonato disuelto se deriva del dióxido de carbono extraído de la atmósfera y liberado en el suelo a través de actividad bioquímica (Tabla 3.1).

Hay una estrecha relación entre la composición química del agua y la de las rocas que la transmiten. La relación puede ser simple, como en el caso de acuíferos profundos y homogéneos, que reciben el agua en un área localizada de recarga y la conducen hasta las áreas de descarga, sin mezclarla con agua procedente de otras fuentes de recarga o de otros acuíferos.

Por el contrario, la relación puede ser compleja cuando se trata de acuíferos interconectados, de diferente composición mineralógica, alimentados por varias fuentes y en los cuales tienen lugar procesos y reacciones químicas, como la precipitación, la adsorción, el intercambio iónico y los asociados con influencias biológicas.

3.4.2. OTROS FACTORES QUE AFECTAN LA COMPOSICIÓN DEL AGUA

Además de la disolución, en el subsuelo tienen lugar diversos procesos que modifican la composición del agua. A continuación se mencionan los más destacados.

Reducción de sulfatos

Consiste en la conversión del sulfato a azufre o a óxidos sulfurosos, propiciada por la acción de bacterias reductoras. El agua sujeta a este proceso tiene olor a ácido sulfhídrico y contiene hierro disuelto.

Intercambio iónico

Este fenómeno tiene lugar cuando el agua circula a través de horizontes arcillosos y afecta principalmente el contenido de los cationes Na, Ca y Mg. Por medio del intercambio, el terreno tiende a alcanzar el equilibrio químico con el agua.

Precipitación

Por disolución, la concentración de una sal disuelta en el agua aumenta con el tiempo hasta alcanzar la saturación con respecto a ese elemento. A partir de ese momento se empieza a precipitar. La mezcla de aguas también puede

Ilustración 3.5 Tiempo de permanencia del agua en el subsuelo

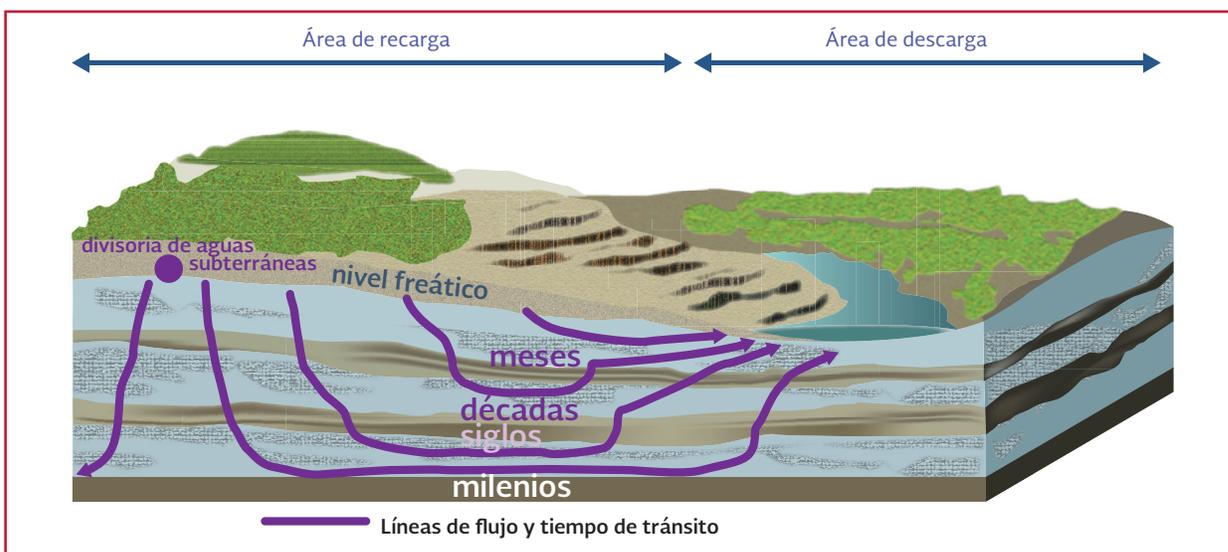


Tabla 3.1 Fuentes naturales de los principales componentes disueltos del agua subterránea

| Componente | Fuentes naturales | Efectos del uso de agua |
|-----------------|---|---|
| Bicarbonato | Caliza, dolomía | Incrustación en calderas |
| Calcio | Feldespatos, calcita, aragonita | Dureza del agua, incrustación |
| Carbonato | Caliza, dolomía | Incrustación en calderas |
| Cloruro | Evaporitas | Corrosión |
| Flúor | Anfíboles, apatita, | 0.6-1.5 ppm: benéfico >1.5 ppm: perjudicial para los dientes |
| Hierro | Micas, magnetita, sulfuro férrico | Puede causar turbiedad y darle coloraciones desagradables al agua y a los alimentos |
| Magnesio | Feldespatos y otros silicatos | Forman costras en las paredes de las calderas |
| Manganeso | Suelos y sedimentos, biotita y hornblenda | Puede causar manchas en los objetos o sabores desagradables |
| Nitrato | Descomposición de materia orgánica | Si la concentración es >1000 mg/L puede causar trastornos fisiológicos |
| Sodio | Feldespatos y otros silicatos | Corrosión en calderas |
| Sulfato | Disolución de yeso y anhídrida | Escamas o costras en las calderas |
| Sólidos totales | Todos los minerales | > 500 mg/L no es potable |
| Disueltos | Todos los minerales | < 300 mg/L para uso industrial |

dar lugar a la saturación y a la precipitación de sales.

Saturación

En los sistemas acuíferos regionales, la salinidad del agua aumenta hasta alcanzar la saturación de los iones. Debido al orden en que el agua se satura (bicarbonato, sulfato, cloruro), en la circulación regional del agua se identifica

un proceso de envejecimiento. Este proceso se manifiesta en el cambio de composición de la bicarbonatada cálcica, predominante en el agua de reciente infiltración, a la clorada sódica, propia del agua más antigua, pasando por la magnésica sulfatada.

La ocurrencia de los procesos referidos no es fácil de inferir a partir de los cambios en la

composición química del agua, ya que a menudo aquellos interactúan y producen efectos secundarios.

Algunos de los procesos señalados pueden modificar las características hidráulicas de los acuíferos. Principalmente la disolución y la precipitación aumentan o disminuyen la porosidad y la permeabilidad, respectivamente. Tal efecto es notable en los terrenos cársticos.

En los estudios hidrogeoquímicos se aplica una metodología que consiste en representaciones gráficas de la variación temporal y espacial de diversos parámetros, como las concentraciones y las relaciones iónicas, los índices hidrogeoquímicos, los perfiles geoquímicos y los diagramas de distribución iónica.

Tales representaciones son interpretadas con base a los conceptos antes expuestos, para inferir el patrón natural del flujo subterráneo, la composición mineralógica de las rocas transmisoras y almacenadoras, la localización de las áreas de recarga y descarga y la interconexión entre acuíferos o su conexión con el mar o con otros cuerpos de agua.

3.5. CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

En el curso de las últimas décadas, la influencia negativa de la actividad humana que afecta la calidad del agua subterránea ha aumentado al grado de inutilizar porciones de algunos acuíferos para ciertos usos y crear riesgos para la salud pública. En este apartado, los términos contaminación y contaminación se utilizan indistintamente, para hacer referencia a la introducción o activación en un acuífero, de cualquier elemento

o sustancia que alcanza concentraciones inconvenientes.

3.5.1. TRATAMIENTO NATURAL EN EL SUBSUELO

El agua es uno de los recursos naturales que ha sido más deteriorado por la contaminación. El daño causado al agua superficial distribuida en ríos, lagos, lagunas y mares es crítico y evidente. En cambio, todavía es vaga la idea que se tiene respecto al deterioro que ha sufrido la calidad del agua subterránea, e incluso persiste la creencia popular de que el agua subterránea está salvaguardada por la naturaleza.

Efectivamente, la calidad del agua subterránea está protegida por una barrera natural: la zona no saturada, constituida por el suelo y los sedimentos no consolidados presentes entre la superficie del terreno y la superficie freática.

En la zona no saturada tienen lugar procesos que evitan, reducen o retardan la contaminación de los acuíferos. Entre ellos destacan la filtración, la intercepción, adsorción y eliminación de microorganismos patógenos, la adsorción y biodegradación de hidrocarburos y de compuestos orgánicos sintéticos, la atenuación de metales pesados y de otros compuestos inorgánicos, por precipitación e intercambio catiónico (Ilustración 3.6).

Adicionalmente, en la zona saturada ocurren otros procesos atenuadores como la dispersión, la precipitación, la mezcla y la dilución.

El grado de atenuación varía ampliamente con las características del suelo y de los sedimentos

subyacentes y también por los tipos de contaminante. La permanencia de los contaminantes en la zona no saturada es un factor importante, que a su vez depende de las características hidráulicas de los estratos que la componen, como su porosidad, su retención específica, su permeabilidad y su contenido de humedad.

Varios de los procesos atenuadores más efectivos tienen lugar en el suelo biológicamente activo, debido a su alto contenido de minerales arcillosos, de materia orgánica y de población bacteriana.

La migración del agua y de los contaminantes en el subsuelo suele ser muy lenta en la mayoría de los terrenos hidrogeológicos. Por lo tanto, pueden transcurrir años o décadas antes de que la contaminación se manifieste en la fuente subterránea.

A pesar de la protección natural mencionada, incluso los acuíferos menos vulnerables a la contaminación están expuestos a largo plazo a que su calidad se vea deteriorada por el con-

tinuo bombardeo de contaminantes móviles y persistentes.

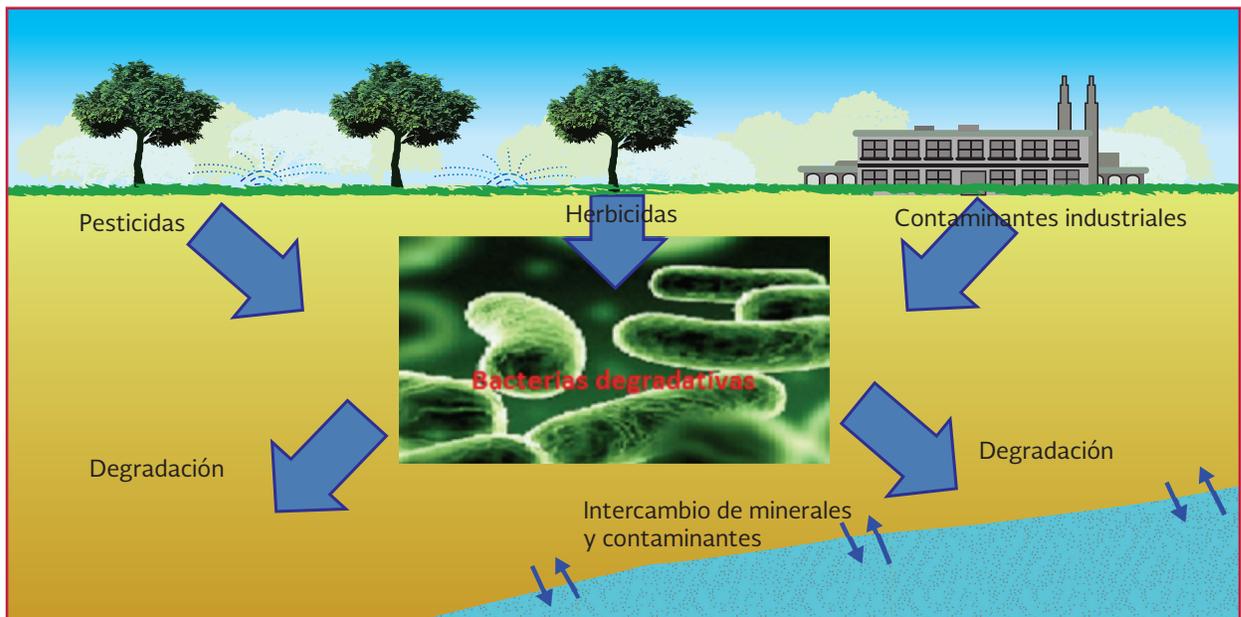
El riesgo principal de contaminación está relacionado con acuíferos libres, especialmente cuando su superficie freática es poco profunda. Por el contrario, los acuíferos profundos y confinados solo pueden ser deteriorados a largo plazo por contaminantes persistentes.

Es importante considerar la capacidad del subsuelo como planta de tratamiento natural para eliminar algunos contaminantes, cuya remoción artificial podría ser innecesaria y muy costosa.

3.5.2 FUENTES DE CONTAMINACIÓN

En las zonas urbano industriales, las fugas en redes de alcantarillado y en depósitos e instalaciones industriales, la descarga de aguas residuales a terrenos permeables, la lixiviación de residuos sólidos en tiraderos o rellenos de basura, son algunos de los principales focos de contaminación.

Ilustración 3.6 El subsuelo: planta de tratamiento



La carga contaminante aportada por estos focos al subsuelo, acarreados en solución por el agua infiltrada, es abundante y variada: minerales, sustancias químicas y compuestos orgánicos, metales pesados, materia orgánica, hidrocarburos, etc. Estos contaminantes pueden ingresar a redes de distribución de agua potable (cuando están despresurizadas) y, si no son eliminados en la zona no saturada, se incorporan a los acuíferos y eventualmente llegan a las fuentes de agua (Ilustración 3.7).

A pesar de que los desarrollos urbanos constituyen focos de contaminación peligrosos por la elevada concentración de carga contaminante que generan, es en las zonas agrícolas donde se produce la carga más cuantiosa y ampliamente distribuida. En ellas se utilizan enormes cantidades de agua, que exceden los requerimientos de los cultivos. Estas aguas en parte se infiltran, acarreado sales, compuestos nitrogenados y fosfatados, metales pesados y compuestos orgánicos y sintéticos, derivados del lavado de los suelos y de la aplicación de fertilizantes y pesticidas (Ilustración 3.8).

La importancia de la producción agrícola en México, es fácil de imaginar tomando en cuenta que a esa actividad se destina anualmente alrededor de 20 mil millones de m³ de agua, procedente de fuentes subterráneas y superficiales, para regar unos 2 millones de hectáreas (Ilustración 3.9).

Especialistas en la materia advierten que la contaminación del agua ha progresado rápidamente en las últimas décadas, a causa del desarrollo intensivo de la agricultura. Así, por ejemplo, el contenido de nitrato disuelto en el agua subterránea ha aumentado, rebasando con frecuencia la norma respectiva (50 ppm). De la misma manera, se ha incrementado la concentración de metales pesados a pesar de la capacidad del subsuelo para fijarlos y eliminarlos en la zona no saturada.

Los asentamientos rurales también constituyen focos de contaminación de las fuentes de agua, especialmente cuando carecen de sistemas de saneamiento básico. Las aguas residuales descargadas en terrenos permeables o en corrientes superficiales, las instalaciones sanitarias rudimentarias y los desarrollos pecuarios, aportan

Ilustración 3.7 Contaminación industrial

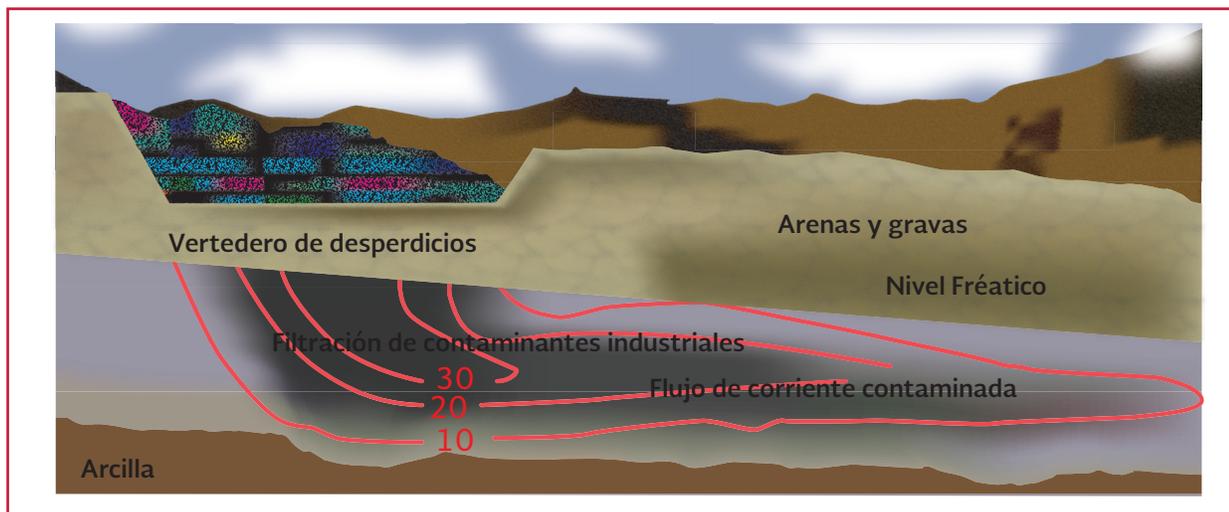


Ilustración 3.8 Contaminación urbana



Ilustración 3.9 Contaminación agrícola



al ambiente una considerable carga mineral, orgánica y bacteriológica que en parte es arrastrada al subsuelo disuelta en el agua infiltrada (Ilustración 3.10).

3.6. LA CALIDAD DEL AGUA Y LA SALUD HUMANA

El agua es uno de los principales medios transmisores de enfermedades causadas por agentes patógenos y químicos. En países en desarrollo los organismos patógenos suelen ser los que pro-

ducen mayor incidencia de enfermedades y de muertes. En México, el agua subterránea juega un papel preponderante en este sentido, ya que del subsuelo se extrae cerca del 80 por ciento del volumen de agua empleada para consumo humano.

Los contaminantes que constituyen una amenaza para la salud humana son innumerables, por tanto, solo se mencionan a continuación algunos de los más peligrosos, clasificados en grandes grupos.

Ilustración 3.10 Contaminación en el medio rural



3.6.1. MICROORGANISMOS PATÓGENOS

La zona no saturada tiene una gran capacidad natural para retener microorganismos y eliminarlos. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, los microorganismos pueden ingresar a los acuíferos y ser transportados por el agua hasta las captaciones.

Es frecuente encontrar en el agua subterránea, protozoarios, bacterias y virus causantes de numerosas enfermedades. Estos microorganismos son acarreados generalmente por la percolación de aguas residuales que estuvieron en contacto con materia fecal.

El riesgo de contaminación biológica de los acuíferos es mayor en las regiones lluviosas que en las zonas áridas y más considerable durante las temporadas de lluvias que en los periodos de estiaje. En cuanto a las instalaciones sanitarias, las

fosas secas son menos peligrosas que aquellas en las que se genera un gran tirante de agua.

La propagación de los microorganismos en un acuífero está vinculada, principalmente, a la velocidad del flujo subterráneo. Como la velocidad en general es baja, la distancia recorrida por los microorganismos suele ser corta en la mayoría de los casos. En acuíferos muy permeables, como los formados por clásticos limpios de grano grueso y por rocas fracturadas o con grandes oquedades, los contaminantes biológicos pueden migrar varios cientos de metros y hasta más de un kilómetro.

El mayor riesgo se presenta cuando los acuíferos de alta permeabilidad con niveles freáticos someros afloran o están apenas cubiertos por una delgada capa de suelo o de material suelto. Los efluentes de las instalaciones sanitarias son directamente inyectados a los acuíferos, sin recibir purificación y los microorganismos son

rápidamente transmitidos hasta las captaciones de agua. Tan desfavorables condiciones son comunes en la península de Yucatán y en las porciones bajas de muchas cuencas donde hay acuíferos someros.

3.6.2. COMPUESTOS ORGÁNICOS

Este grupo incluye a cientos de compuestos utilizados en instalaciones industriales, comerciales y domésticas, de los cuales algunos se suponen carcinogénicos. Aunque su contenido en el agua subterránea suele ser muy bajo, su concentración inocua para la salud humana no es conocida.

Los más comunes son los hidrocarburos clorinados, componentes de pesticidas y herbicidas. Muchos contienen una sustancia letal, llamada dioxina, que es muy persistente en el medio y que tiene efectos tóxicos en el ser humano. En algunos países, varios de estos compuestos (como el DDT) han sido eliminados debido a su negativo impacto ambiental.

Otros compuestos incluidos en este grupo, son los productos derivados del petróleo, el tricloroetileno, el tolueno y el clorobenceno, los tres últimos utilizados como solventes, desengrasantes y limpiadores.

3.6.3. COMPUESTOS INORGÁNICOS

Entre los componentes inorgánicos, uno de los más nocivos debido a su movilidad y estabilidad, y ampliamente distribuido es el nitrato. Otros compuestos comunes son el cloro, el sulfato sodico, el hierro, el fósforo, el manganeso y el potasio. Su presencia en concentraciones supe-

riores a las normas respectivas puede ocasionar daños a la salud, desde irritaciones gastrointestinales menores hasta enfermedades renales o cardiovasculares.

3.6.4. METALES PESADOS

Los metales pesados como el cadmio, el cromo, el plomo y el mercurio, entre otros, representan un alto riesgo para la salud humana. Afortunadamente, tienden a ser inmovilizados en el terreno por precipitación, adsorción y otros procesos. En la Tabla 3.2 se muestra una relación de los contaminantes seleccionados, indicándose su impacto en la salud humana.

3.7. VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN

El riesgo de contaminación del agua subterránea se eleva por la combinación de dos factores principales: la presencia de una carga contaminante aplicada al subsuelo y la vulnerabilidad del acuífero subyacente a la contaminación. Puede considerarse al riesgo de contaminación como la probabilidad de que un acuífero dado sea contaminado en concentraciones superiores a las permisibles, según las normas de calidad aceptadas.

La vulnerabilidad de un acuífero es la medida de su sensibilidad a ser afectado en su calidad por una carga contaminante. Por analogía, se considera como el concepto inverso a la capacidad de asimilación de un cuerpo de agua.

Básicamente, la vulnerabilidad de un acuífero depende de la capacidad de atenuación de la zona no saturada. Esta propiedad intrínseca del medio, interactúa con las características de

la carga contaminante tipo, como la magnitud, la carga hidráulica y la forma de disposición, lo que da como resultado un nivel de riesgo de contaminación.

Mediante una metodología sencilla desarrollada por un grupo de especialistas de la OPS provenientes de diversos países, entre ellos, México, se representa la vulnerabilidad relativa de los acuíferos a la contaminación por medio de un índice. Dicho índice es evaluado a partir de datos disponibles en los estudios hidrogeológicos de propósito general.

Los parámetros más representativos y adecuados, por su fácil obtención, para evaluar el índice de vulnerabilidad son; el tipo de ocurrencia del agua subterránea, las características litológicas de los materiales presentes en la zona no saturada y la profundidad a la superficie freática.

A los factores indicados se les asigna un valor menor que uno, seleccionado dentro de intervalos que representan la vulnerabilidad del acuífero con respecto a cada uno de aquellos. El índice de vulnerabilidad es calculado como el producto de los tres valores anteriores. Cuanto mayor es la vulnerabilidad, tanto mayor es el valor del índice. Los valores próximos a uno corresponden a los acuíferos expuestos a la contaminación.

Como un ejemplo ilustrativo de aplicación, puede considerarse el caso del acuífero de Yucatán, en la zona de Mérida. Por tratarse de un acuífero libre, se le asigna un valor de 0.9 al índice de ocurrencia. Dado que la zona no saturada es de unos cuantos metros y no hay suelo ni materiales granulares, se le asigna también un

valor alto, de 0.9, al índice correspondiente. Por último, como la superficie freática se encuentra a pocos metros de la superficie del terreno, el índice respectivo es de 0.9. El índice de vulnerabilidad resultante es de 0.73, representativo de uno de los acuíferos más expuestos a la contaminación en nuestro país.

Para la aplicación del método descrito cuando los datos disponibles son inciertos o la zona no saturada es muy heterogénea, es conveniente efectuar la evaluación considerando las condiciones que implican mayor riesgo de contaminación. En estos casos es recomendable:

- Considerar la litología de los materiales predominantes en la zona no saturada
- Suponer la condición de no confinamiento en caso de que el tipo de acuífero sea incierto
- Evaluar el acuífero más somero en caso de que se identifiquen varios, excepto cuando se trate de un acuífero colgado local.

Los índices así evaluados pueden mostrarse gráficamente mediante mapas representativos de la vulnerabilidad relativa del acuífero a la contaminación. Los mapas son de gran utilidad práctica para anticipar el emplazamiento de desarrollos potencialmente contaminantes, diseñar programas de monitoreo de la calidad del agua subterránea y programar estudios específicos de contaminación.

En todo caso, debe recordarse que a largo plazo, todos los acuíferos son vulnerables a los contaminantes móviles, persistentes y no degradables, originados por una actividad contaminante continua y ampliamente

distribuida, y que los acuíferos menos vulnerables a la contaminación, suelen ser los

más difíciles de recuperar una vez que son afectados por ésta.

Tabla 3.2 Efectos sobre la salud de algunos compuestos químicos de uso doméstico común

| Componente | Riesgos para la salud |
|-------------------|---|
| Bencenos | Carcinogénico |
| Tetracloruro | Carcinogénico, daños al hígado y a los riñones |
| Clorobencenos | Irritante, posibles daños al hígado y a los riñones |
| Diclorometano | Irritante de las vías respiratorias, depresión nerviosa. Altera la capacidad oxigenadora de la sangre |
| M-xileno | Posible afectación de la capacidad reproductora. Daños a los riñones |
| Naftaleno | Daños al hígado. Desórdenes sanguíneos |
| O-fenylfenol | Depresión nerviosa e irritante |
| Pentaclorofenol | Tóxico para el hígado, riñones y sistema nervioso |
| Fenol | Quemaduras a la piel. Depresión nerviosa |
| Tetracloroetileno | Carcinogénico y mutagénico, daños al hígado |
| Tolueno | Riesgo para la reproducción, daños al hígado y a los riñones |
| Tricloroetileno | Carcinogénico, daños al sistema nervioso central |



4

EQUIPOS Y MÉTODOS DE PERFORACIÓN

La tecnología de construcción de pozos para la explotación de los recursos naturales presentes en el subsuelo de nuestro país ha tenido un desarrollo espectacular en el transcurso de las últimas décadas. En particular, la tecnología para la captación del agua del subsuelo se ha desarrollado de forma notable, paralelamente a los avances tecnológicos de la industria petrolera.

Muchos son los métodos de perforación que se han desarrollado como respuesta a la amplia variedad de condiciones geológicas en que se emplean, desde rocas duras hasta materiales no consolidados. De tal forma, se ha notado que para ciertas condiciones, un método resulta más conveniente que los demás, ya que sus resultados, tanto técnicos como económicos, son buenos. Sin embargo, esto no implica que tal método sea el mejor ni el más eficiente en todos los casos, tanto por las condiciones geológicas como por los aspectos prácticos. Es decir, no existe un método 100 por ciento eficiente e utilizable bajo cualquier condición natural, ya que puede verse afectado dependiendo de la profundidad a perforar, del diámetro que se pretenda lograr, del tipo de formación del terreno, de los requerimientos sanitarios y del uso para el que está propuesto el pozo.

Para construir pozos destinados a la captación del agua subterránea, generalmente

se utilizan dos sistemas básicos de perforación: el de percusión y el rotatorio. Con el tiempo, han surgido varios métodos que, conservando los principios básicos de uno o de ambos sistemas, se basan en nuevas técnicas y muestran mayor versatilidad. De tal forma, se tiene el sistema rotatorio de circulación inversa, el neumático y el de vibropercusión, entre otros.

4.1. MÉTODOS CON SISTEMA DE PERCUSIÓN

Este procedimiento de perforación es uno de los más antiguos que se conocen. Hace milenios que los chinos lo empleaban con éxito a pesar de sus herramientas tan rudimentarias. Gradualmente ha sido desplazado por los modernos equipos de perforación rotatoria, pero aún es utilizado preferentemente para construir pozos en cierto tipo de terrenos. La utilización de la percusión se basa en la fragilidad de las rocas.

4.1.1. POZOS PUNTA

Los pozos perforados por este método se construyen introduciendo en el terreno una punta

de material resistente (punta de pozo), ajustada al extremo inferior de las secciones de tubería. La punta del pozo debe hincarse hasta cierta profundidad en la formación acuífera y bajo el nivel freático. La parte ascendente de la tubería sobre la punta del pozo actúa como el entubado protector.

Los diámetros de las puntas oscilan entre 1.25" y 2". Esta punta se une a la tubería por medio de coples o mediante una soldadura. Los tramos de la tubería tienen dimensiones entre 1.2 y 1.5 metros.

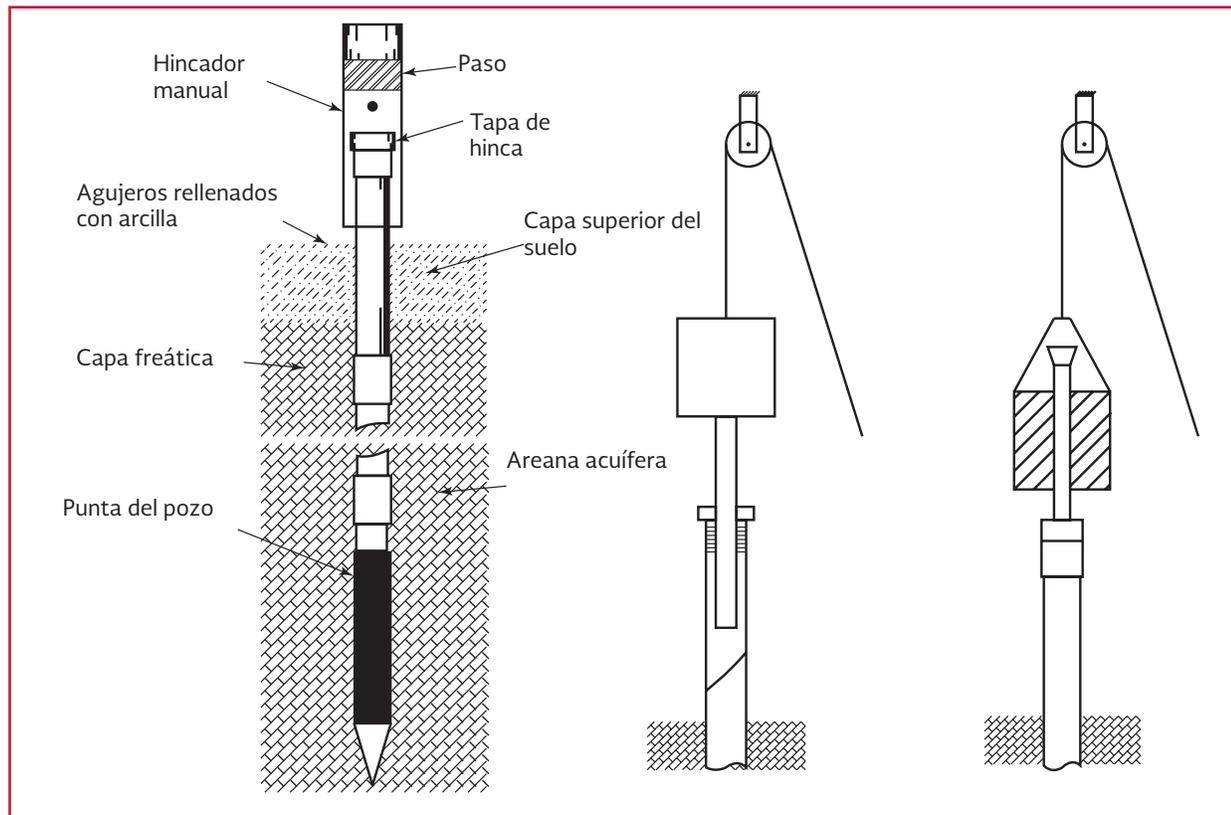
El equipo usado incluye un martillo, una tapa para golpear que protege el extremo ascendente de la tubería durante la operación, un triple, una polea y una cuerda de alta resistencia. Además, es posible incluir un malacate y un aparejo diferente al tripié. El mecanismo perforador se puede

de impulsar por métodos manuales, alcanzando profundidades un poco superiores a los 9.0 m (30 pies), en materiales como arenas o arenas y gravas con horizontes arcillosos, o con la ayuda de máquinas, mediante un martinete montado en un triple, torreta o mástil, logrando profundidades superiores a los 15 m (50 pies), utilizando martinetes de más de 4.41 kN (450 kg).

La Ilustración 4.1 muestra el mecanismo de pozos punta para un método totalmente manual. Junto se muestra el equipo operado comúnmente por un montaje de perforación con la ayuda de un triple, polea y malacate.

Cualquiera que sea la forma de golpeo, primero se realiza un agujero inicial barrenando o cavando hasta una profundidad de 60 cm (2 pies) o más. Como la penetración es más fácil en una formación saturada, el agujero inicial debe ha-

Ilustración 4.1 Pozo punta manual y Pozo punta con polea y malacate



cerse lo bastante hondo para penetrar en la capa freática, si esta no es muy profunda. El agujero inicial debe ser vertical y ligeramente mayor en diámetro que la punta del pozo. La punta del pozo se introduce en este agujero y se perfora a la profundidad deseada, agregándose tramos de tubería vertical según sea necesario.

Los acoplamientos de la tubería deben tener extremos rebajados y cuerdas para proporcionar conexiones más fuertes que los acoplamientos de plomería ordinaria. Las cuerdas de la tubería y acoplamiento deben cubrirse con compuesto para roscas, a fin de obtener uniones herméticas. El conjunto de perforación debe guiarse tan verticalmente como sea posible. Aun cuando el golpeteo puede hacerse con un mazo pesado, no se recomienda, ya que resulta difícil aplicar golpes rectos y sólidos con un mazo y los golpes desviados podrían quebrar o torcer la tubería. Por ello, al estar suspendido el martinete, debe colgar directamente sobre el centro del pozo. El peso de esta herramienta puede variar entre 0.33 y 1.32 kN (34 y 135 kg). Se pueden utilizar de mayor peso (hasta 4.41 kN o 450 kg) pero requieren del uso de un elevador mecánico (malacate) o de un dispositivo de perforación.

Las uniones flojas deben apretarse periódicamente haciendo girar ligeramente la tubería con una llave. El giro violento de la tubería no facilita la penetración y sí puede ocasionar daños a la punta del pozo, por lo tanto, esto debe evitarse.

Mediante esta técnica es extremadamente difícil o imposible atravesar limos densos y arcillas o aglomeraciones limo arcillosas. En material grueso, la penetración está fuertemente influenciada por la presencia de boleos grandes.

Cuando se introduce la tubería en limos o arcillas con el cedazo abierto, se corre el riesgo de que este se tape, siendo difícil de limpiar o reabrir durante el desarrollo del pozo, particularmente si el cedazo está emplazado en una zona de baja permeabilidad.

Aplicaciones de los pozos punta

- Monitoreo del nivel del agua en formaciones someras
- Muestreo de agua, principalmente para control de contaminantes (monitoreo de contaminación)
- Desagüe
- Abastecimiento de agua
- Bajos costos de aplicación

Limitaciones de los pozos punta

- Alcance limitado en cuanto a la profundidad, aproximadamente 15 m (excepto en material arenoso)
- Diámetro reducido de ademe
- No permite tomar muestras del suelo
- El ademe de acero interfiere con algunos análisis químicos
- La falta de detalles estratigráficos provoca incertidumbre respecto a las zonas en donde se debe colocar el cedazo o si atraviesa áreas contaminadas
- No funciona al tratar de penetrar materiales duros
- No presenta espacio anular

4.1.2. PERCUSIÓN Y CHORRO

Este método emplea dos fuerzas en combinación. Por un lado, un chorro o corriente a alta velocidad de un fluido para cavar un pozo, el chorro de fluido afloja los materiales del subsue-

lo y los transporta hacia arriba y fuera del agujero. Además, se emplea la fuerza por golpeteo constante de una herramienta de corte, mediante un movimiento de ascenso y descenso.

Las herramientas de perforación del método de percusión y chorro consisten de un trépano en forma de cincel fijado al extremo inferior de una sarta de tubería. Unos agujeros practicados a cada lado de la aleta del trépano sirven como boquillas para dar paso a los chorros de fluido que mantienen limpio el trépano, lubricado y frío y que además, ayudan a aflojar el material que se va perforando.

Para bombear hacia el interior del pozo el fluido de perforación, se usa una bomba con capacidad de aproximadamente 500 L/min a una presión de 343.23 a 490.33 kPa (3.5 a 5 kg/cm²) que impulsa el fluido a través de una manguera apropiada y una pequeña articulación giratoria en la parte superior de la tubería. El fluido, al salir por el trépano, fluye en forma ascendente por el espacio anular que se encuentra entre la tubería de perforación y las paredes del pozo, arrastrando así los cortes en suspensión hacia la superficie, depositándolos en una o más fosas, en donde estos se sedimentan. Desde aquí, el fluido es de nuevo aspirado por la bomba y recirculado a través de la tubería. Una bomba recíproca del tipo pistón sería preferible a una centrífuga. En esta, el mantenimiento es más complejo como resultado de las fugas en los sellos, los impulsores gastados y los desgastes en otras partes móviles.

Un triple hecho con tubería de hierro que sirve para suspender el arreglo de perforación, un

aparejo de polea sencilla y un cable de alta resistencia, complementan el equipo.

Para iniciar la perforación, se puede impulsar el movimiento ascendente y descendente de toda la sarta por medio de un malacate (Ilustración 4.2). De igual forma, se gira manualmente toda la sarta de perforación para hacer que el trépano corte un agujero circular y cambie el sentido de impacto en el material del fondo del pozo.

Hasta la fecha, su empleo se ha limitado a la perforación de pozos de 7.5 a 10 cm de diámetro con profundidades que rondan los 60 m. Sin embargo, con esta técnica se han logrado pozos de hasta 300 m de profundidad, pero no de manera eficiente, por lo que, para este rango de profundidades, ha sido desplazado por otros métodos.

El fluido de perforación puede ser agua simple, principalmente cuando las condiciones del barreno sin derrumbes lo permiten. Para evitar los derrumbes que se presentan de manera moderada, se puede agregar algún aditivo al agua, principalmente bentonita, hasta formar un fluido liviano. Cuando los derrumbes son relativamente fuertes, debe instalarse un ademe que siga muy de cerca al trépano cuando se está trabajando. Cuando no hay ademe o este solo se encuentra en las partes superiores del barreno, las esquirlas representan un buen registro de las variaciones litológicas y estratigráficas del terreno.

El sistema de percusión y chorro puede usarse para la penetración de algunas formaciones constituidas por areniscas o esquistos que no sean muy duras. Su mayor rendimiento se logra al perforar arenas acuíferas en pozos de diámetro pequeño. Las arcillas duras y forma-

ciones guijarrosas le confieren problemas de avance.

Aplicaciones de los pozos percusión y chorro

- Permite la medición de niveles de agua
- Recolección de muestras en forma de esquirlas
- Propio para formaciones no consolidadas
- Puede emplearse en algunas formaciones duras
- Bueno para barrenos de 4", con ademe de 2"
- Monitoreo de agua para control ambiental

Limitaciones de los pozos percusión y chorro

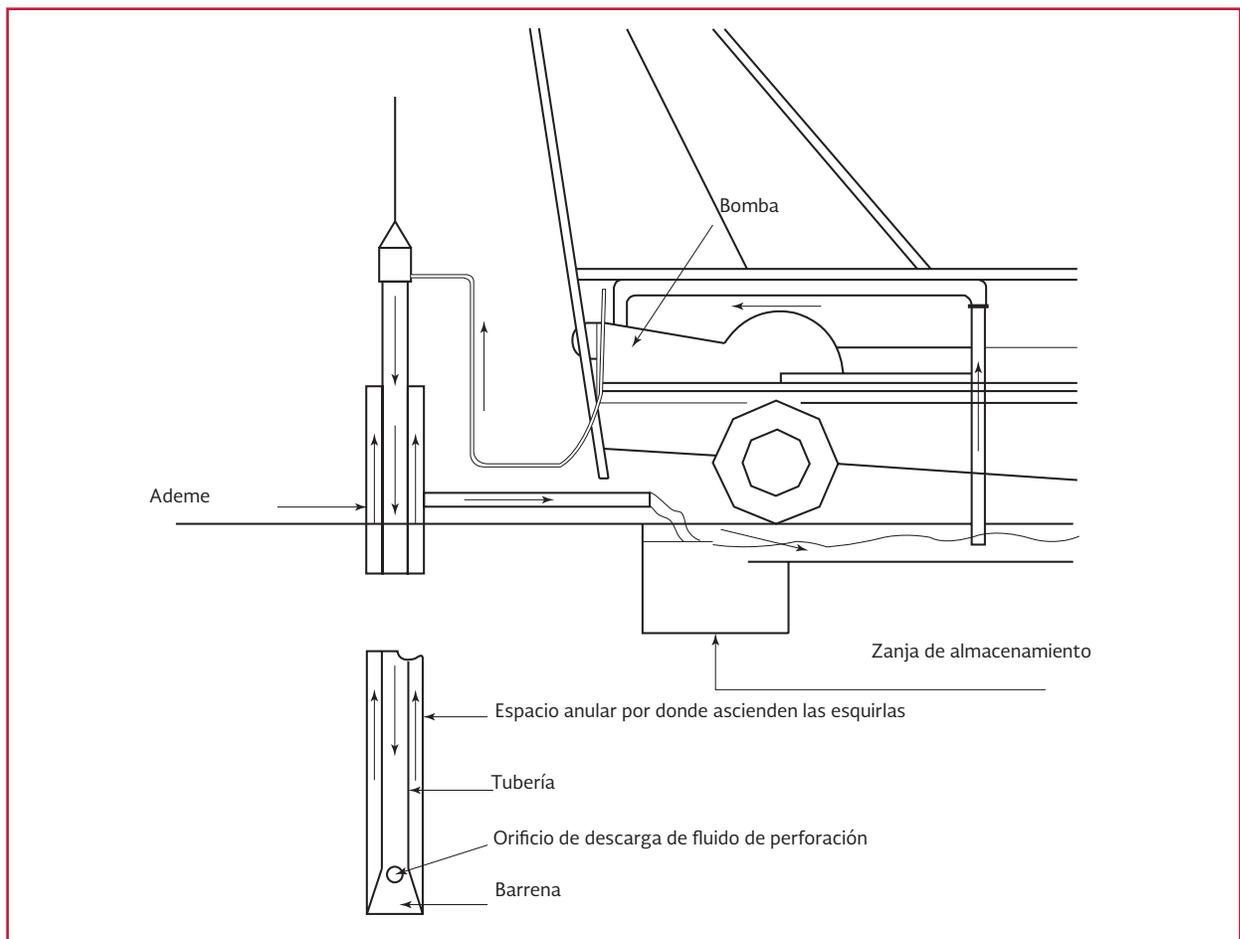
- Necesita fluido de perforación para rescatar los cortes

- Diámetro limitado a 4"
- Desarrollo lento en formaciones densas, como arcillas con boleas
- Alteración posible en las formaciones al presentarse colapsos si el pozo no es ademado inmediatamente y por lo tanto, hay mezcla de fragmentos de roca

4.1.3. PERFORACIÓN POR PERCUSIÓN CON CABLE Y HERRAMIENTA

El método de percusión con cable y herramienta es uno de los más antiguos empleados en la construcción de pozos. Ha sobrevivido por cientos de años debido a que es útil en una amplia variedad de condiciones geológicas, pudiendo

Ilustración 4.2 Perforación por percusión y chorro



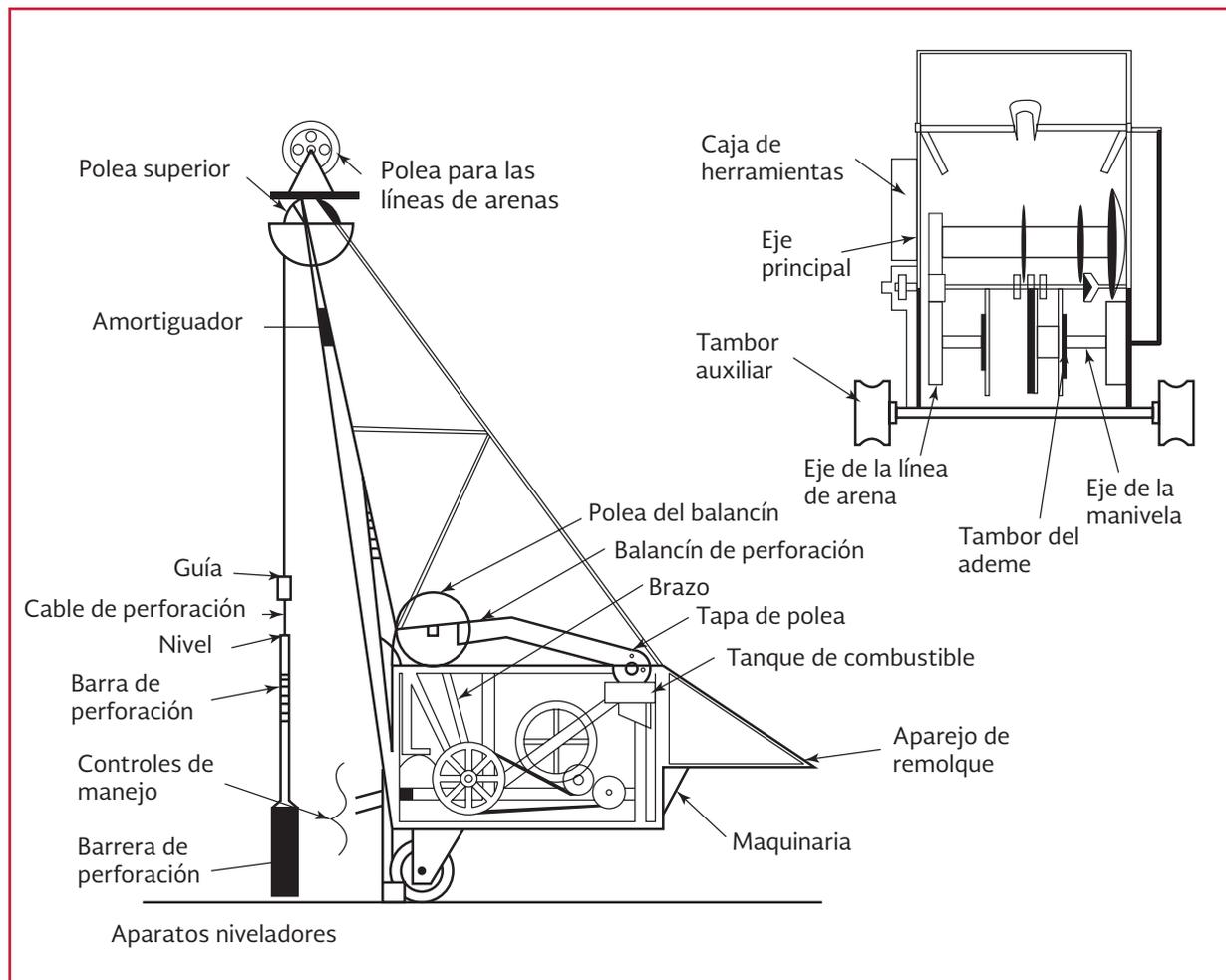
ser en ocasiones la mejor opción y en algunos casos el único método posible a usarse. Utiliza la caída libre de una barrena pesada que va aplicando golpes contra el fondo de un agujero y penetrando de esta manera en el suelo. Los cortes se retiran periódicamente por medio de un achicador o bomba de arena. Las herramientas para perforar y desazolver se llevan en líneas o cables separados enrollados en tambores elevadores independientes.

Los componentes básicos de un equipo de perforación por cable y herramienta son la unidad de fuerza motriz para impulsar el carrete del cable de perforación y el carrete de la bomba de arena, y un balancín para impartir el movimiento de

las herramientas de perforación, montadas en un bastidor que lleva una grúa o mástil de pozo, adecuado para el uso de una línea de herramientas de perforación (Ilustración 4.3)

La sarta completa de perforación está constituida por 4 elementos: la barrena, la barra de peso, la tijera o percusores de perforación y el portable giratorio. La barrena se usa para aflojar los materiales de roca o quebrarlos y al oscilar los mezcla con un fluido. En conjunto, los materiales se extraen por medio de un achicador, cuchara o bomba de arena. Cuando se perfora en formaciones secas, debe agregarse agua para formar el lodo. El paso del agua sobre la barrena permite el movimiento del lodo relativo a ella,

Ilustración 4.3 Perforación por percusión con cable y herramienta



y por lo tanto, facilita el movimiento oscilante de caída libre de la barrena. La barra de peso situada inmediatamente sobre la barrena, solo proporciona peso adicional a esta y agrega longitud a la línea de herramientas para percibir que la perforación sea recta.

Los percusores son un par de barras de acero, las que pueden moverse entre sí en una dirección vertical. El juego o carrera de los percusores de perforación es de 15 a 23 cm (6 a 9"). Los percusores de perforación deben diferenciarse de los de pesca, de igual diseño, pero con una carrera mayor de 45 a 90 cm (18 a 36") y que se utilizan para pescar o recuperar herramientas que se han soltado de la línea de perforación en el agujero.

El portacable giratorio conecta la línea de herramientas con el cable de perforación. Está construido de tal manera que proporciona una ligera rotación a las herramientas de perforación en el sentido de las manecillas del reloj, en relación con el cable. A este último se le denomina línea de perforar. La rotación impuesta a las herramientas asegura que la perforación forme un pozo de sección circular.

Las herramientas se acoplan por medio de conexiones tipo caja y pasador, con diseños y dimensiones normadas, así como por medio de roscas también normadas por el API (American Petroleum Institute).

La herramienta extractora del material ya perforado puede ser una cuchara o una bomba de arena. La primera es una sección de tubo con una válvula de retención en el fondo. La válvula puede ser de tipo plano o de dardo. La bomba de arena es una cuchara dotada de un émbolo que, al desplazarse hacia arriba, produce un vacío

que abre la válvula y succiona la arena o el lodo que contiene los fragmentos, haciéndolos penetrar al tubo. Las bombas de arena se fabrican siempre con válvulas de retención de tipo plano.

La sarta de perforación debe golpear en el fondo del pozo estando el cable de perforación tenso, para ser levantado rápidamente por el impulso ascendente de la máquina, es decir, debe existir una sincronización entre la caída de las herramientas y la extensión del cable (velocidad de la máquina). Esto implica que haya ductilidad y elasticidad en el cable y en algunas partes del mecanismo de la sarta.

Para proporcionar esta elasticidad, se instala un amortiguador en la polea de la corona del cable de perforación, ubicada en la cima de la torre o mástil. En términos generales, se recomienda que el peso más apropiado del equipo, el ajuste de la carrera de herramientas, la velocidad de perforación para obtener el impacto adecuado, sean establecidos gracias a la experiencia del perforista.

Algunos factores que pueden afectar la velocidad de perforación o su eficiencia son:

- Resistencia de la roca
- Peso de las herramientas
- Longitud de la carrera
- Número de golpes por minuto
- Diámetro del barreno
- Tipo de barrena
- Profundidad del barreno
- Densidad del lodo acumulado en el fondo
- Características de las formaciones perforadas

Cuando se perforan rocas duras, la acción de la sarta de perforación es esencialmente de triturador.

En la perforación de formaciones no consolidadas, el avance de la barrena debe ser seguido de cerca por el ademe, con el objeto de evitar que el pozo se cierre o que ocurran socavamientos laterales. La acción de la barrena es de aflojamiento y de mezclado del material. La actividad fracturadora es de poca importancia, salvo cuando aparecen cantos grandes.

El orden de operaciones en este tipo de formaciones es el hincado, perforación y limpieza, las cuales se repiten hasta que se logren las profundidades deseadas, tanto de ademe como del pozo mismo. Cada una de las actividades, en términos generales, consume una cantidad de tiempo similar.

La operación de hincado del tubo de ademe requiere que el extremo inferior del mismo se cubra con una zapata protectora, al igual que la parte superior se cubre con un cabezal de hincado que sirve de yunque. Es importante que en los primeros 12 a 18 m, el ademado se dirija verticalmente.

Cuando no se puede hacer descender el ademe a una mayor profundidad o cuando su penetración pudiera resultar dañina, debe introducirse un tubo de menor diámetro por dentro del primero. La perforación se continúa entonces por la parte interior del ademe menor. Esto necesariamente implica una reducción en el diámetro del pozo. Debido a las circunstancias específicas del pozo, se necesita hacer una, dos o más reducciones antes de llegar a la profundidad deseada. Por ello, a menudo se inicia con un diámetro mayor al escogido como final del pozo.

Cuando se permite que las herramientas cuelguen libremente, hay que cuidar que el alineamiento de la sarta de perforación sea concéntrico dentro del entubado. Deben efectuarse comprobaciones periódicas con una plomada o nivel de carpintero a lo largo del tubo en 2 posiciones, aproximadamente en ángulos rectos uno con respecto al otro, para asegurar que se está perforando el pozo recto y vertical.

Aplicaciones de la percusión con cable

- Puede usarse en cualquier tipo de formación, sin embargo, está mejor adaptado que otros métodos para perforar en formaciones no consolidadas que contienen rocas y bloques grandes
- Puede emplearse en la perforación de cualquier diámetro y profundidad
- El equipo es fácil de transportar
- El equipo es de diseño sencillo y requiere un mínimo de mantenimiento. Las máquinas requieren de un consumo reducido de energía
- Se pueden recuperar muestras a cualquier profundidad. Excelente en el muestreo de materiales granulares gruesos
- Se puede emplear en lugares con poca agua
- Los pozos se construyen con una posibilidad mínima de contaminación
- El perforista mantiene un contacto íntimo con el proceso de perforación y el tipo de material que se cruza, mediante tacto con el cable de perforación
- Generalmente solo se necesita una cuadrilla reducida para operar el equipo
- Es de fácil operación y puede utilizarse

- en situaciones difíciles, en terrenos inaccesibles o en áreas de espacio reducido
- Se puede operar en cualquier régimen de temperatura
- Se puede emplear en formaciones en donde hay pérdidas de fluidos de perforación
- Los pozos que emplean este método pueden ser verificados en cualquier momento para determinar su avance y verticalidad
- El desarrollo de pozo es fácil y práctico
- No requiere de trabajos adicionales, ni el uso de agentes dispersantes para la limpieza de los pozos

Limitaciones de la percusión con cable

- Avance de perforación relativamente lento comparado con otros métodos
- Falta de rigidez en la sarta de perforación que provoca poco control de la verticalidad del pozo
- Debido a la necesidad de cierta elasticidad en el equipo de perforación, principalmente en el cable, el efecto cortante se reduce
- Cuando se cortan materiales no consolidados, las paredes se colapsan, retrasando el avance de la perforación, lo que implica un ademado cuyo costo final es elevado
- No permite un muestreo de buena calidad en formaciones consolidadas. En las no consolidadas de grano fino, mezcla los horizontes perforados al rescatar la muestra

4.2. MÉTODOS CON SISTEMA POR ROTACIÓN

Este sistema de perforación, en su esencia, era conocido desde el tiempo de los egipcios, quienes lo aplicaron en la perforación de rocas duras y para hacer agujeros de poca profundidad en las rocas de las pirámides.

El sistema rotatorio es actualmente el más utilizado. Puede decirse que ha desplazado al sistema de percusión. En el transcurso de las últimas décadas, como parte del desarrollo de la tecnología de perforación dentro de la industria petrolera, se han fabricado máquinas rotatorias de mayor capacidad y eficiencia. Adaptados para su empleo en la construcción de pozos para captación de agua, con estos equipos se han alcanzado profundidades de 2 000 m con diámetros hasta de 76.2 cm (30").

4.2.1. BARRENOS MANUALES (HAND AUGER)

El barrenado de los pozos de diámetro pequeño se efectúa comúnmente con barrenos para tierra accionados manualmente, aunque en algunas ocasiones se pueden emplear barrenos motorizados para una o dos personas. Se muestran en la Ilustración 4.4 y la Ilustración 4.5.

Un buen muestreo puede obtenerse reduciendo el tamaño de la barrena conforme se alcanza la

Ilustración 4.4 Barrenos manuales



Ilustración 4.5 Barrena espiral



profundidad deseada, reduciéndose además la energía necesaria para mover la herramienta.

Las barrenas de mano comunes se componen de un vástago con un mango en el extremo y una punta con hojas curvas en la parte inferior. Las hojas son fijas pero hay barrenas con hojas intercambiables que se adaptan a diámetros de 0.0762 a 0.2286 m (3" a 9").

Estos barrenos manuales pueden usarse en la instalación de pozos de monitoreo someros (más de 5 m de profundidad) con tubería de 5 cm o

menos. Usualmente los vástagos se fabrican en secciones de 1.2 a 1.5 m con acoplamiento de fácil sujeción.

La perforación se inicia empujando las hojas de la punta para hincarlas en el suelo con un movimiento de rotación. El giro se continúa hasta que la punta de la barrena se encuentra llena de material, entonces se saca la herramienta del agujero, se vacía y vuelve a usarse. Se agregan extensiones del vástago, según se necesite, para perforar hasta la profundidad deseada. Por lo común, los pozos de profun-

didad menor de 4.5 m (15 pies) no requieren más equipo que la barrena. Sin embargo, para pozos de mayor profundidad, es necesario emplear un triple ligero con una polea en el extremo o una plataforma elevada, de manera que el vástago de la barrena se pueda insertar y extraer del agujero sin desconectar todas las secciones del mismo.

Generalmente el pozo no puede construirse en presencia de agua, ya que las paredes se pueden colapsar. Para estabilizarlas, es necesario introducir un fluido a la perforación, a fin de igualar las presiones y evitar que se derrumben las paredes. El fluido puede ser agua simple o adicionada con algún aditivo.

El barrenado manual puede aplicarse en avances de corta longitud en acuíferos someros, con la ayuda de tubería de ademe. En formaciones de arcilla, limo y arena no sujetas a hundimiento, se pueden alcanzar profundidades de aproximadamente 15 m. El barrenado, cuando sucede el colapso, puede hacerse bajando el ademe hasta el fondo de pozo y continuar la perforación poco a poco mientras se hinca el ademe.

Cuando el barrenado cruza rocas grandes o guijarros, en lugar de la barrena normal, se emplea una barrena espiral (ilustración 4.5).

Aplicaciones del barrero manual

- Se puede emplear en investigaciones de suelos someros
- Para muestreo de suelos
- Identificación de zonas con comportamiento diferente del agua
- Instalación de piezómetros, lisímetros y pozos de monitoreo

- Se puede usar con cualquier material de ademe

Limitaciones del barrero manual

- Solo se usa para profundidades someras
- Incapaz de perforar suelos densos o muy duros
- La estabilidad de las paredes del pozo dificultan su mantenimiento
- Requieren de una labor manual intensiva

4.2.2. PERFORACIÓN CON BARRENA TALADRO SÓLIDA (SOLID FLIGHT AUGER)

Las barrenas tipo taladro son usadas en secciones múltiples con continuidad en las ondulaciones laterales.

La primera sección o parte inferior está equipada con una cabeza cortante de aproximadamente 5 cm de largo y con un diámetro similar al de las secciones superiores. Conforme avanza la sección inferior cortante dentro de la tierra, los fragmentos sueltos del terreno son transportados hacia arriba por el movimiento de rotación de las ondulaciones laterales (Ilustración 4.6).

Toda la barrena es rotada en sentido contrario a las manecillas del reloj. Un equipo le imprime tanto la rotación como el impulso descendente, que es provocado mediante empuje hidráulico o mediante algún otro dispositivo. Los tramos individuales de barrena tienen una longitud de 1.52 m y se encuentran ensamblados por una variedad de seguros distintos o combinados. Cuando los barrenos tipo taladro son usados para la instalación de pozos de monitoreo, es posible emplear diámetros de barrena entre 15 y 35 cm

(6" y 14") en su dimensión exterior. La mayoría de los equipos de perforación usados en la instalación de pozos de monitoreo en material no consolidado pero estable, pueden alcanzar profundidades de 21 m con diámetros de 35 cm (14") y aproximadamente 45 m con diámetro de 15 cm (6").

En suelos estables, los cortes pueden ser colectados en la superficie como material que es rodado hacia arriba por las ondulaciones laterales de la barrena taladro. Sin embargo, esta acción es frecuentemente un paso secundario, dado que muchas veces estos cortes se introducen por el mismo movimiento de la barrena dentro de las paredes del pozo, principalmente en las formaciones someras. Los cortes frecuentemente caen de regreso dentro del pozo a través del espacio anular y pueden llegar a la superficie hasta que son desalojados junto con otros materiales en una mezcla heterogénea. No es posible efectuar el muestreo después de que se cruza la primera zona saturada.

Algunas muestras pueden ser colectadas, realizando una rotación cuidadosa de la barrena a la profundidad deseada, deteniendo su rotación en el momento indicado y removiéndola del pozo. En una formación relativamente estable, las muestras se encuentran pegadas en las ondulaciones laterales y se pueden colectar cuando la barrena es removida del pozo. Las muestras inferiores son más representativas de las formaciones perforadas a profundidad y se pueden obtener, desalojando el material exterior de las muestras colectadas en las ondulaciones. Debido a que es posible la creación o localización de pequeñas cavernas, después de que la zona saturada es alcanzada, la recolección de muestras por debajo del nivel freático es casi imposible.

El pozo puede ser perforado por algún otro método después de que la barrena es removida, sin embargo, no se debe emplear un método a chorro, ya que el movimiento rápido del agua puede provocar el colapso del pozo. Esto es particularmente cierto en formaciones densas.

Ilustración 4.6 Barrena taladro sólida



Debido a que el núcleo de las barrenas tipo taladro es de acero sólido, la única forma de coleccionar muestras inalteradas es por medio de cucharas o por muestreadores de pared delgada, y también utilizando un tubo muestreador insertado en la parte inferior de la barrena. Sin embargo, esta actividad es muy lenta y representa una pérdida de tiempo considerable, ya que se tiene que desarmar y armar la barrena frecuentemente. Esto obliga a efectuar una serie de maniobras, cada vez que se desee tomar una muestra. Además, sólo es posible efectuarlas si las paredes del pozo son lo suficientemente estables como para no colapsarse durante el muestreo. Los pozos no son estables por lo general, especialmente después de que han cruzado zonas saturadas de agua, o moderadamente saturadas, por lo que no es posible hacer un muestreo bajo estas condiciones.

Es difícil instalar la tubería del ademe y del pozo mismo una vez que ha sido penetrada la zona saturada. Bajo estas circunstancias, se recomienda taladrar hasta la parte superior de la zona saturada, remover la barrena tipo taladro y proseguir empleando algún otro método de perforación.

Aplicaciones de la barrena taladro sólida

- Investigaciones someras de suelos
- Muestreo de suelos
- Instalación de pozos de monitoreo en la zona vadosa
- Instalación de pozos de monitoreo en la zona saturada en suelos estables
- Identificación de la profundidad del lecho rocoso
- Es un método rápido y dinámico

Limitaciones de la barrena taladro sólida

- Muestreo de suelos inaceptable, a menos que se emplee cuchara o tubos de muestreo
- Los datos proporcionados por una muestra de suelo se encuentran restringidos a profundidades y áreas en donde el suelo sea predominantemente estable
- Imposible de aplicar en la instalación de pozos de monitoreo en la mayoría de los acuíferos en formaciones no consolidadas, debido a que este procedimiento puede provocar la creación de cavernas en las paredes del pozo y por tanto, inestabilidad de las mismas
- La capacidad de profundizar disminuye conforme se incrementa el diámetro de perforación
- El diámetro de los pozos está limitado por el diámetro de las ondulaciones laterales de la barrena

4.2.3. PERFORACIÓN CON BARRENA TALADRO HUECA (HOLLOW STEM AUGER)

Al igual que el método anterior, el equipo de perforación por taladrado con tubería hueca usa una barrena acompañada por ondulaciones laterales con una cabeza cortante en su parte inferior, de igual forma gira y aplica presión hacia abajo, gracias a dispositivos mecánicos neumáticos ubicados en superficie. Los fragmentos de material cortado también ascienden a la superficie rodando sobre las ondulaciones continuas de la barrena.

A diferencia del equipo anterior, este tiene un centro hueco (Ilustración 4.7). La barrena, al ir descendiendo, actúa como ademe y estabiliza al mismo tiempo el pozo. Por el centro hueco de la barrena se pueden introducir sartas de perforación de diámetro pequeño, así como equipos muestreadores.

Para coleccionar las muestras, primero se debe taladrar hasta la profundidad deseada, mediante los movimientos giratorios y de presión descendente, antes de introducir el equipo de muestreo.

El interior de los taladros de tubería hueca puede limpiarse desde afuera del pozo si es necesario. El equipo de muestreo son cucharas con contenedores tipo canasta, muestreadores con una barrena o tubería de diámetro pequeño.

Los métodos de muestreo que emplean fluidos a alta presión no se deben utilizar en este caso, ya que provocan mezcla y alteran el material de muestreo. También originan inestabilidad en las paredes del pozo, por lo que deben utilizarse los

métodos de la cuchara muestreadora o los tubos de pared delgada. Ambos se colocan en la parte final de la tubería de perforación, en la base del pozo. La cuchara puede emplearse para coleccionar muestras cuando la mezcla de materiales no importe, mientras que el muestreador de pared delgada, aplicado a presión, se utiliza para obtener muestras inalteradas de los horizontes ubicados inmediatamente abajo de la cabeza cortante. Las muestras se pueden tomar de manera continua o tan solo en horizontes específicos. Cada vez que se saca una muestra, el interior de la barrena debe limpiarse para evitar contaminaciones.

Aprovechando la tubería hueca de este tipo de barrena, como acceso (y como ademe) al interior del pozo, es posible perforar por debajo de la zona saturada. Cuando la zona saturada se penetra, la mezcla de material granular fino y agua puede formar un lodo que cubre las paredes del pozo. Esta mezcla de lodo puede sellar las zonas productoras de agua y minimizar su introducción en el pozo. Este sello es incontrolable e impredecible debido a que depende de tres circunstancias:

Ilustración 4.7 Barrena taladro hueca



- El tipo de material (limos y arcillas) que sirve de sello
- La diferencia de presiones entre las zonas
- La transmisividad de las zonas

Cuando se atraviesa una zona contaminada, el desarrollo del sello de lodo durante la perforación puede no ayudar a detectarla o prevenirla. Otros medios mediante los cuales los fluidos contaminados se pueden introducir dentro del pozo son las uniones entre tramos de barrena. Para prevenir este problema o minimizarlo, se colocan sellos de goma en las uniones.

Al desarrollarse la perforación dentro de una formación acuífera, se hace bajo presiones confinantes bajas. La grava y arena del acuífero están muy densas por la humedad como para ser levantadas por medio de la tubería. Esto se debe también a que la presión en el acuífero es mayor a la que se tiene en el interior del pozo. Bajo estas circunstancias, la parte inferior de la barrena se obtura con sedimentos, los que son desalojados después de que la muestra se ha colectado. Sin embargo, esta actividad puede ser costosa y provoca una pérdida de tiempo considerable.

La perforación con barrena tipo taladro de tubería hueca (Ilustración 4.8) se limita a utilizarse en materiales no consolidados. Sin embargo, es posible emplear este método para atravesar lechos rocosos, siempre y cuando al extremo cortante se le adicione un dispositivo con dientes cortantes de mayor resistencia (carburo de tungsteno).

En general, la tubería completa se puede emplear como ademe temporal para prevenir la entrada de flujos laterales de agua al pozo. Sin embargo, los taladros de tubería hueca no constituyen

aislantes completos, por ello no se recomiendan cuando se cruza o cuando aparecen horizontes contaminantes.

Cuando se llega a roca y es imposible su avance, la tubería puede emplearse como ademe, mediante el cual se perfora la roca en diámetros más pequeños e incluso se muestrea.

Los diámetros mayores a los que se puede perforar con este método son de 16 cm (6") de diámetro exterior y 8 cm (3") de diámetro interior.

Las profundidades que pueden alcanzarse oscilan entre 45 y 55 m en suelos arenosos, arcillas y limosos. Se pueden conseguir profundidades mayores, pero el muestreo es casi imposible.

Existe equipo con diámetro exterior de 30 cm (12") e interior de 15 cm (6"), sin embargo, la profundidad alcanzada no rebasa los 23 metros.

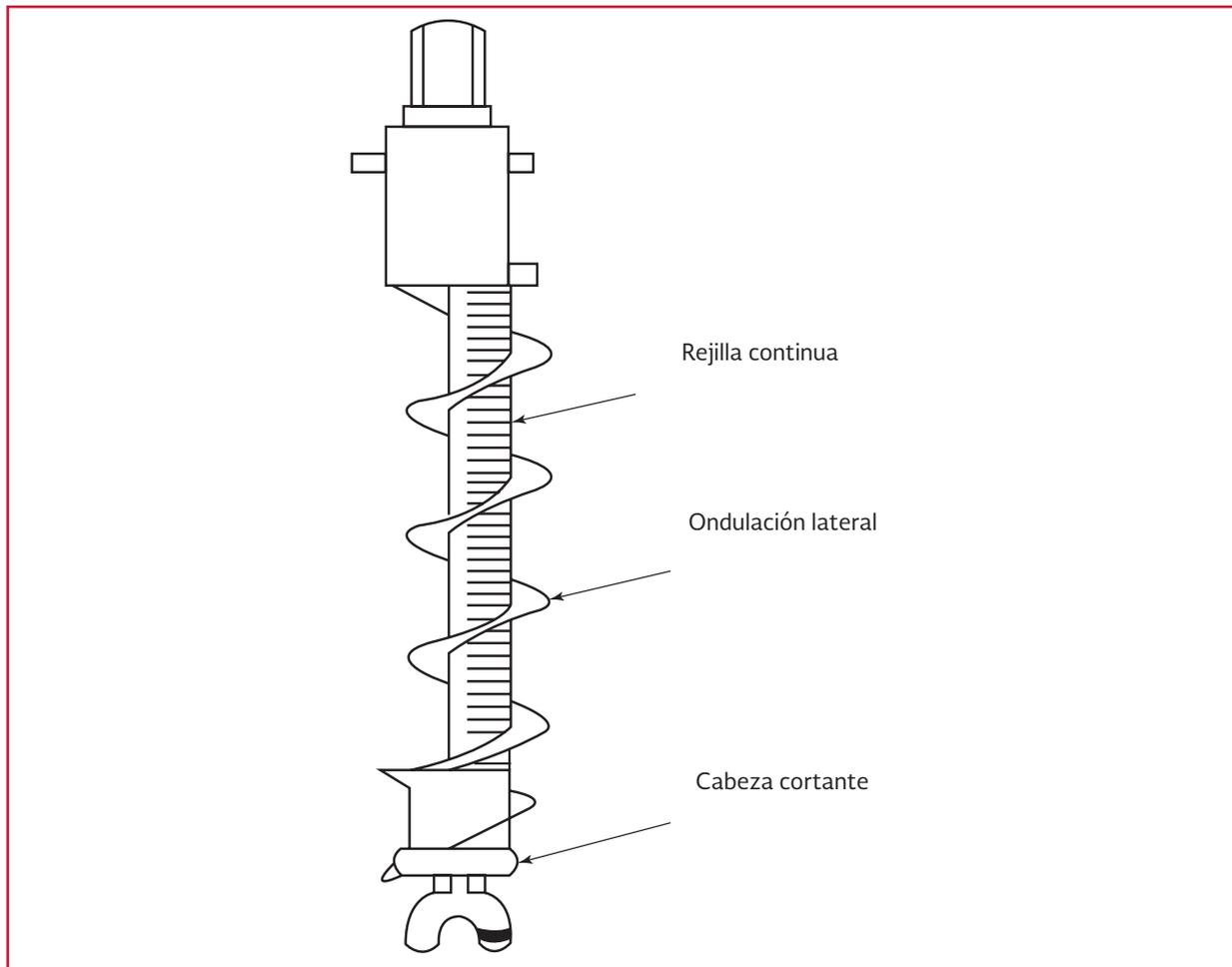
Aplicaciones de la barrena taladro hueca

- Puede emplearse en todo tipo de suelos
- Permite un buen muestreo de suelos empleando cuchara o muestreador de pared delgada
- Muestreo de la calidad del agua
- Para la instalación de pozos de monitoreo en todas las formaciones no consolidadas
- Puede servir como ademe temporal para el muestreo de rocas
- Se puede emplear como ademe en formaciones relativamente estables

Limitaciones de la barrena taladro hueca

- Dificultad para la preservación y obtención íntegra de muestras en formaciones densas
- El agua o fluido de perforación empleado

Ilustración 4.8 Barrena cedazo



para controlar la densidad puede invadir y alterar las formaciones atravesadas

- No es posible controlar la contaminación a través del espacio anular
- La dimensión de ademe se limita al tamaño del diámetro interior del equipo de perforación
- La arcilla aglomerada en la tubería puede sellar el acuífero que se desea probar

4.2.4. PERFORACIÓN CON ROTACIÓN Y AIRE

El equipo rotatorio de perforación que utiliza aire comprimido como fluido de perforación constituye un avance notable en la industria de

la perforación de pozos. En este sistema se hace circular aire a presión por la tubería de perforación, el cual escapa por las aberturas del trépano, subiendo luego por el espacio anular que rodea a la tubería. El aire que se desplaza a gran velocidad dentro del pozo arrastra los fragmentos hasta la superficie y expulsa los que se encuentran atrapados en las fisuras de las rocas.

Este procedimiento solo se puede aplicar en formaciones consolidadas. Las máquinas de perforación rotaria diseñadas para este tipo de trabajo vienen equipadas con un compresor de aire de gran capacidad y con una bomba convencional de lodo. El lodo para perforar puede utilizarse cuando se está perforando en materiales

derrumbables que se encuentren sobre un basamento rocoso. Posteriormente, cuando se ha atravesado el material no consolidado, la perforación puede proseguir dentro de la roca utilizando aire como fluido de perforación. Al pasar a circulación de aire y para evitar derrumbes, es recomendable instalar ademe en el tramo del relleno superior.

Cuando se perfora con aire también se pueden utilizar las barrenas tricónicas para roca, similares a las que se emplean en la perforación con lodo. Se emplean en diámetros de 30 cm (12"), aun cuando es posible utilizar diámetros mayores. El tipo que se conoce como barrena o trépano incrustado resulta conveniente sobre todo para formaciones duras. Este trépano se fabrica con incrustaciones de carburo de tungsteno fijadas a la periferia de los rodetes de acero.

De manera experimental se ha demostrado que cuando se utiliza aire comprimido en lugar de lodo de perforación, la velocidad de penetración es mayor, lo mismo que la duración del trépano o de la barrena. Sin embargo, cuando se está penetrando dentro de una formación acuífera, la velocidad de penetración no es mayor a la que se obtiene al perforar con lodo. Con todo, la mayor ventaja que se tiene con este procedimiento es que la limpieza del fondo es mayor que la que se logra con otros métodos.

Otro trépano que se utiliza en el sistema rotatorio con aire comprimido es un martillo o martinete neumático colocado en el extremo inferior de la tubería que combina el efecto percusivo con la acción rotatoria. Esta herramienta se llama martillo descendente. Posee incrustaciones resistentes de carburo de tungsteno, que son las que proveen las superficies de corte y

que pueden afilarse mediante esmerilado cuando las condiciones de operación indican que el martillo ya no está cortando adecuadamente (Ilustración 4.9).

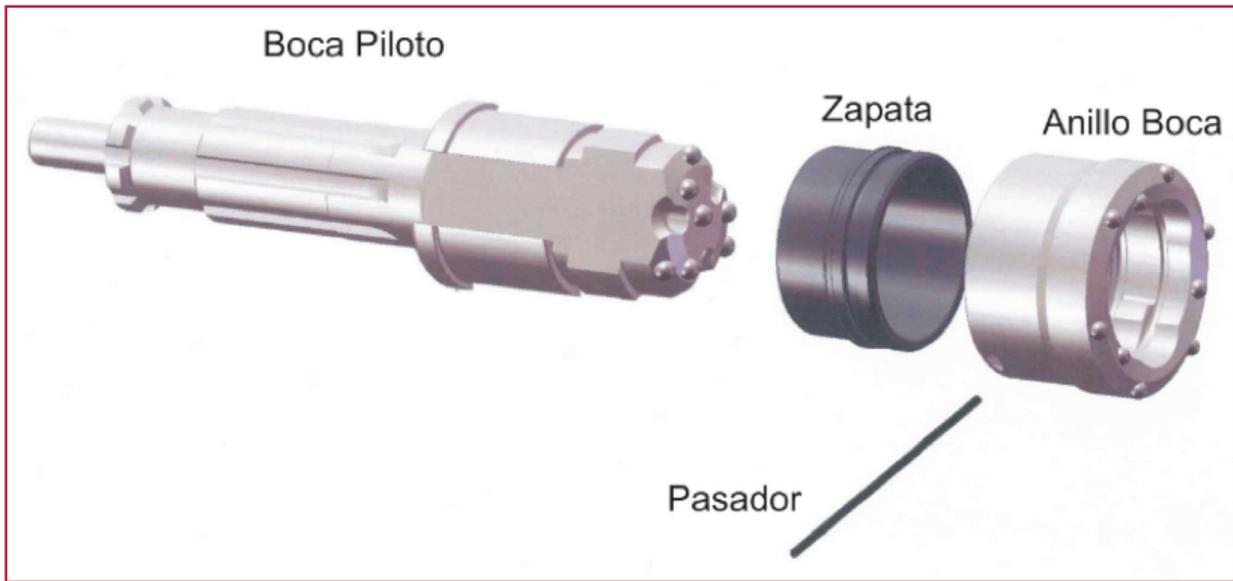
La velocidad de penetración en diversas rocas es mayor que cuando se utilizan otros métodos y tipos de herramientas. Hasta ahora, los martillos de gran diámetro no han resultado prácticos. El máximo tamaño que se utiliza es de 15 cm, aunque también se dispone de 20 cm.

El aire comprimido debe suministrarse a una presión de 686.46 a 755.11 kPa (7 a 7.7 kg/cm²). Algunas herramientas necesitan hasta 1372.93 kPa (14 kg/cm²). Para extraer los fragmentos con efectividad, la velocidad ascendente del aire dentro del espacio anular debe ser de unos 900 m/min o mayor. Al perforar pozos de 10 cm de diámetro, el abastecimiento de aire libre debe ser por lo menos de 170 m³/h. La velocidad apropiada de rotación es de 10 a 30 revoluciones por minuto, siendo preferible una velocidad reducida en las rocas duras y abrasivas.

El costo por metro de perforación con este sistema está determinado en forma sensible por la duración y el costo de los martillos. Al escoger el tipo de martillo más ventajoso en el presupuesto del proyecto, se debe tener en cuenta la experiencia local y los tipos de rocas consolidadas que se van a perforar.

Una de las ventajas prácticas de la perforación por este método consiste en que el perforador puede observar cuánta agua es expulsada del pozo junto con los fragmentos, conforme avanza la perforación. De esta forma, puede juzgar si el pozo ha alcanzado la suficiente profundidad como para producir el rendimiento que se desea obtener.

Ilustración 4.9 Martillos de fondo



En la Ilustración 4.10 se pueden apreciar los materiales rocosos en los cuales operan más eficientemente tanto la barrena tricónica como el martillo.

Aplicaciones de la perforación con rotación y aire

- Perforación rápida en formaciones consolidadas y semiconsolidadas
- Buena calidad y confiabilidad en la obtención de muestras, particularmente si se añaden pequeñas cantidades de agua y surfactante
- Permite la fácil y rápida identificación de los cambios litológicos
- Permite la fácil identificación de las zonas que contienen la mayor cantidad de agua
- Permite la estimación de la producción de agua en un intervalo de tiempo corto

Limitaciones de la perforación con rotación y aire

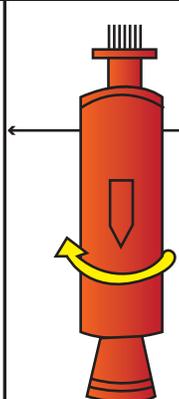
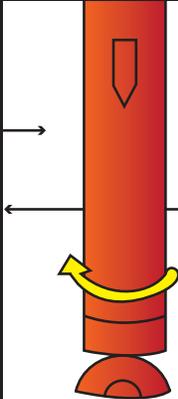
- Requiere de la utilización de ademe en la parte superior del pozo

- Su empleo se restringe a formaciones consolidadas y semiconsolidadas
- Las muestras que se obtienen por este método son cortes de dimensiones reducidas que dificultan su interpretación
- El empleo de aire a alta presión puede inhibir el brote de pequeñas zonas productoras de agua, así como provocar la penetración de fragmentos de roca en zonas porosas provocando contaminación y modificando además las condiciones químicas o biológicas del terreno

4.2.5. PERFORACIÓN ROTARIA CON ADEME A PERCUSIÓN

Este método es una adaptación del método por rotación y aire comprimido empleando como técnica adicional la introducción en el terreno de un ademe en un movimiento coordinado con la perforación rotaria normal. La técnica de penetración del ademe por percusión permite la perforación en formaciones no consolidadas. El mecanismo que introduce el ademe se encuen-

Ilustración 4.10 Comparación entre Martillo y Barrena tricónica

| Guía para seleccionar método de perforación | | | |
|---|--|--|---------------------|
| | Tipo de perforación | | |
| Orden geológico | Ignéas metamórficas | Sedimentarias | |
| Ejemplos | Granito cuarcita Basalto esquistos gneiss | Caliza arenisca lutita | Arcilla arena grava |
| Pureza | Muy duro a duro | Duro a suave | No consolidado |
| Método de perforación |  <p>Martillo Inferior</p> |  <p>Perforación rotaria</p> | |
| | ← Dientes de carburo | ← Asme o Espumizante | ← Lodo |
| | | ← Dientes de acero | |
| Díámetro | Pequeño (6 - 4 in) | Pequeño a medio (12 - 8 in) | |
| Profundidad | Profundidad (15 - 61 in) | Somero a profundo (15 - 300 in) | |

tra instalado en una torre o mástil, en la porción superior del dispositivo de perforación rotaria.

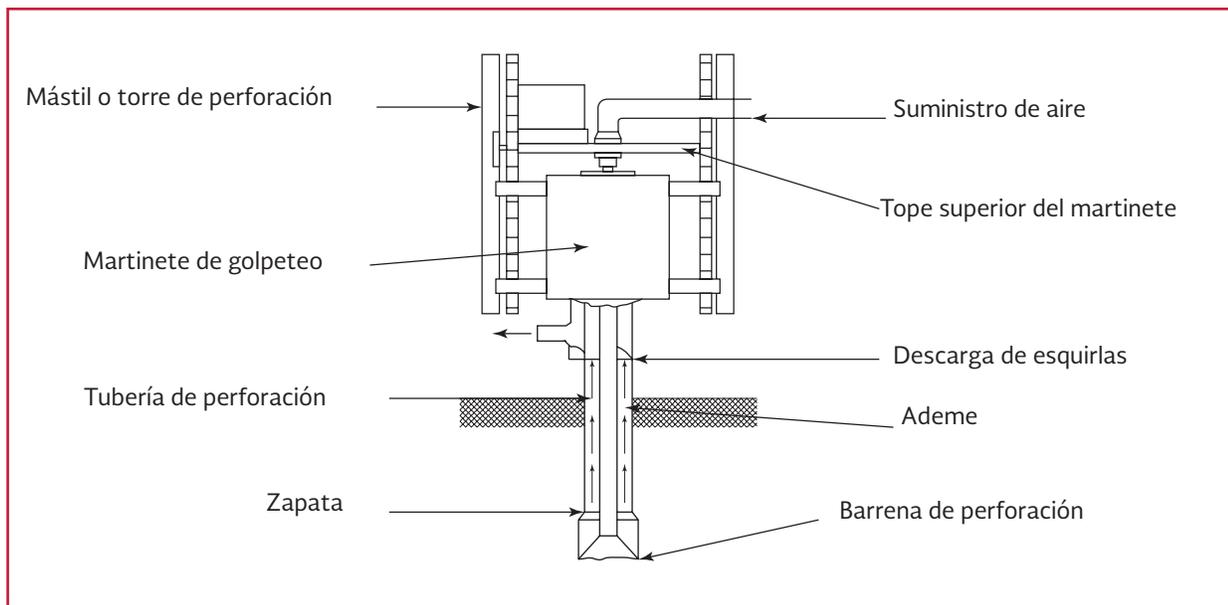
Este método combina de manera simultánea el avance de una barrena por movimiento rotatorio, que es seguida muy de cerca por una tubería de ademe que penetra en el terreno mediante el golpeteo que sobre ella se lleva a cabo desde la superficie (Ilustración 4.11).

En una perforación normal, la barrena avanza por delante del ademe a una distancia de 15 a 30 cm, distancia que está dada en función de

la estabilidad de las paredes del pozo. Mediante este método es posible perforar formaciones no consolidadas en las que se presenten cavernas o espacios abiertos con relativa frecuencia y que mediante el empleo de otras técnicas es imposible superar.

Mediante el empleo de este método es posible efectuar cualquier limpieza del pozo por dentro del ademe. De igual forma, este método impide que se presenten contaminaciones o que los fluidos de perforación influyan en las formaciones del terreno.

Ilustración 4.11 Perforación rotaria con ademe a percusión



Cuando se perforan terrenos con formaciones tanto no consolidadas como consolidadas, se puede ejecutar la penetración simultánea del ademe hasta alcanzar el material consolidado, prosiguiendo posteriormente mediante el método normal de perforación rotaria con aire comprimido. La combinación de estos procedimientos es particularmente eficiente cuando se perforan terrenos con una combinación de arenas, gravas, arcillas, guijarros o bloques. Las arenas o las gravas y las zonas inestables son soportadas por el ademe, mientras que los fragmentos rocosos duros son penetrados por la barrena mediante el movimiento rotatorio.

Debido a que las partes superiores de los pozos se encuentran ademadas, la contaminación que incide en los acuíferos someros es mínima. La protección que representa el ademe permite la obtención de un buen muestreo de las formaciones localizadas por debajo de él, aun cuando sean solo cortes de pequeñas dimensiones. Una

ventaja adicional de este método consiste en que el mismo equipo que introduce el ademe en el terreno puede emplearse en otras maniobras que llevan a la terminación del pozo, como por ejemplo, la instalación de la rejilla, el levantamiento del ademe, etcétera.

Mediante este método, los brotes de aguas subterráneas pueden identificarse y evaluarse de manera simultánea, conforme el avance de la perforación se lleva a cabo. Sin embargo, al igual que en el método anterior, el empleo de aire a altas presiones puede inhibir el brote de mantos acuíferos cuya presión sea menor a la del aire utilizado como fluido de perforación. Adicionalmente, el polvo creado durante el proceso de perforación puede sellar estas zonas de manera definitiva. Por esta razón es necesario que la perforación se realice de manera cuidadosa y que periódicamente sea detenida, con el fin de verificar la presencia o no de pequeños brotes de agua subterránea.

Aplicaciones de la perforación rotaria con ademe a percusión

- Perforación rápida en materiales no consolidados tales como arena, arcillas y limos
- Aplicable en la perforación de material aluvial, incluyendo formaciones guijarrosas
- El ademe, además de soportar las paredes del pozo, impide la contaminación por acuíferos someros de mala calidad
- Mediante este método los problemas por pérdida de circulación de los fluidos de perforación quedan eliminados
- Se tiene un buen muestreo de las formaciones perforadas
- El daño provocado en las formaciones por el descenso del ademe es mínimo

Limitaciones de la perforación rotaria con ademe a percusión

- Las pequeñas manifestaciones de agua subterránea que comúnmente tienen espesores delgados y presiones bajas, son inhibidas por el empleo del aire a alta presión, por ello es común que no sean identificadas y su volumen no pueda ser aprovechado, lo cual en muchas ocasiones representa una pérdida apreciable
- Las muestras obtenidas de las formaciones de subsuelo se encuentran por lo común pulverizadas, lo cual limita la interpretación
- El empleo del aire a altas presiones puede modificar las condiciones biológicas y químicas del terreno

4.2.6. PERFORACIÓN ROTARIA CON CIRCULACIÓN DIRECTA

El método de perforación por rotación consiste en crear un agujero mediante la acción rotatoria de una barrena y la remoción de los fragmentos que se producen se realiza mediante un fluido que continuamente se hace circular, conforme el trépano penetra en los materiales de la formación. La barrena o trépano se fija al extremo inferior de una sarta de tubería. En el sistema rotatorio de circulación directa, el fluido de perforación es bombeado por la tubería y expulsado por las boquillas de esta. El lodo fluye verticalmente hasta la superficie por el espacio anular alrededor de la tubería. Ya en la superficie del terreno, el fluido se conduce hasta una fosa de sedimentación y de ahí a otra de reserva, de la que es de nuevo bombeado al interior del pozo una vez que el contenido de fragmentos se ha sedimentado (Ilustración 4.12). La circulación del fluido de perforación en el sentido opuesto ha dado origen a la perforación rotaria con circulación inversa. En esta variante el fluido se inyecta por el espacio anular y retorna por el interior de la tubería de perforación (Ilustración 4.13).

Las cuatro funciones fundamentales de los fluidos de perforación en el método de perforación rotaria con circulación directa son:

- Enfriar y lubricar la barrena de perforación, así como la tubería y bomba de lodos
- Estabilizar las paredes del pozo
- Prevenir la entrada de fluidos provenientes de las formaciones perforadas

Ilustración 4.12 Perforación rotaria con circulación directa

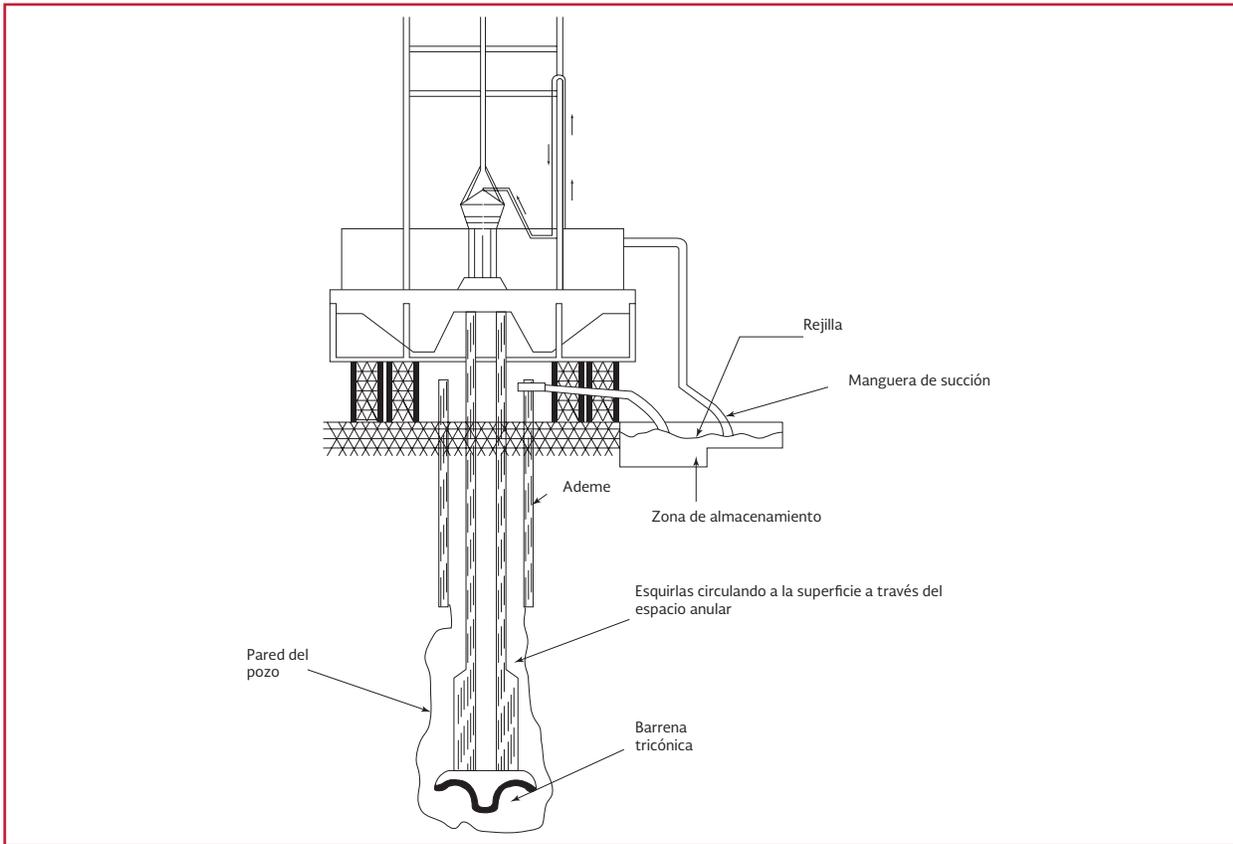
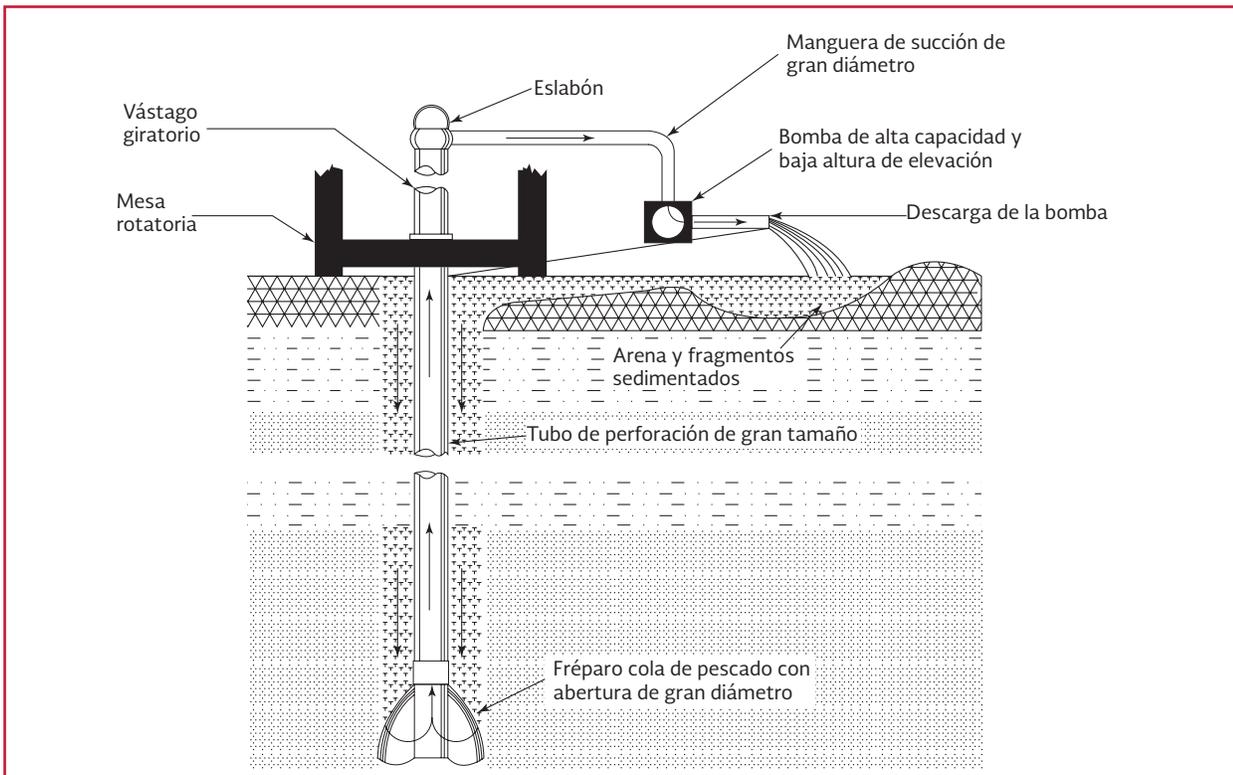


Ilustración 4.13 Circulación inversa de fluidos



- Minimizar las probabilidades de contaminación entre mantos acuíferos atravesados

Los dos elementos clave en el método de perforación por rotación son el trépano o barrena y el fluido de perforación. Ambos resultan indispensables al cortar y mantener el pozo. Todos los componentes que constituyen la máquina de perforación por rotación, se diseñan para efectuar simultáneamente estas dos funciones: la operación de la barrena y la circulación del fluido.

En este método se emplean dos tipos de barrenas: las de arrastre (barrenas tipo cola de pescado o de tres aletas) y las de rodetes dentados (barrenas para roca o de conos).

Las barrenas de arrastre tienen aletas cortas. Cada una de ellas tiene un filo cortante con un tratamiento endurecedor en la superficie. Las boquillas o eyectores cortos dirigen chorros de fluido de perforación (lodos) por debajo de las aletas para mantenerlas limpias y enfriarlas. Las barrenas de arrastre ejercen rápidamente su acción cortante en arcillas y arenas, pero no son eficientes en grava gruesa o en formaciones rocosas.

Las barrenas de rodetes dentados o conos ejercen una acción cortante y de trituración logrando cortar las formaciones duras con efectividad. Los rodetes o conos tienen dientes endurecidos de gran variedad de formas y de separaciones. Desde el interior de la barrena y en la parte superior de cada rodete, se hace dirigir un chorro de fluido de perforación que lava las superficies cortantes. Los rodetes son por lo común de forma cónica, montados sobre ejes y cojinetes colocados a cierto ángulo con el eje de la barrena. Hay un diseño de cuatro rodetes, dos fijados a un ángulo y los otros dos fijados al eje vertical de la barrena.

Por la aceptación que tiene, es evidente que la barrena tricónica es la mejor que puede escogerse. La elección de los cortadores, así como del número y longitud de los dientes, depende principalmente del tipo de formación que se deba perforar (Ilustración 4.14), (anexo C: Herramientas de corte).

La barrena se ubica en el extremo inferior de la barra de perforación, que esencialmente consiste de un eje tubular largo. La barra de perforar consta de tres partes: una o más barras de peso, justamente por encima de la barrena, uno o más

Ilustración 4.14 Tipos de barrenas tricónicas



Ilustración 4.15 Tipos de barrenas ciegas



Ilustración 4.16 Tipos de barrenas ciegas



tramos de tubería de perforación y el vástago giratorio o barra Kelly.

Se emplean una o más barras de peso en la parte inferior del conjunto para contribuir a mantener el pozo recto y vertical.

La tubería de perforación consiste en conductos, por lo general en tramos de 6 m de longitud, con un acople macho en un extremo y un hembra en el otro; varían de diámetro, desde 60 mm hasta 114 mm.

Una regla que puede seguirse en la selección del diámetro de la tubería de perforación, es aquella que indica que debe emplearse tubería cuyo diámetro exterior de acople sea dos tercios el diámetro del pozo. Sin embargo, esta relación puede resultar poco práctica al perforar pozos cuyo diámetro sea mayor de 25 cm.

La barra Kelly constituye la sección situada en lo más alto de la columna de tubería de perforación. La barra pasa y se fija en la mesa rotatoria. La forma exterior de la barra puede ser cuadrada, hexagonal o cilíndrica con ranuras longitudinales. Mientras gira, la barra Kelly se desliza hacia abajo entre los cojinetes de guía para seguir el descenso de la barrena conforme avanza la perforación.

El extremo superior de la barra Kelly va conectado a un eslabón giratorio con acople de rosca izquierda, que permite el paso del fluido de perforación.

La sarta completa de perforación se suspende de un eslabón giratorio que permite el paso del fluido de perforación, el cual a su vez se encuentra suspendido del mástil o torre por medio de una polea viajera. Un resistente cojinete de empuje

axial, instalado entre las dos partes del eslabón, soporta todo el peso, permitiendo a la sarta de perforación girar libremente.

Las muestras que se obtienen mediante este método son pequeños cortes que solo proporcionan una idea parcial de las formaciones que son perforadas, por ello cuando el muestreo es de importancia, se deben emplear dispositivos muestreadores especiales como cucharas, muestreadores de pared delgada o barriles *wire fine*.

Aplicaciones de la perforación rotaria con circulación directa

- Perforación rápida en arcillas y limos compactados así como en arenas y gravas
- Permite el muestreo de núcleos de roca consolidada mediante el empleo del dispositivo adecuado
- Permite el muestreo de materiales no consolidados empleando cucharas y muestreadores de pared delgada
- El equipo de perforación está ampliamente disponible en el mercado nacional
- Se cuenta con una gran variedad de herramientas que permiten perforar a varios diámetros y profundidades
- Se pueden usar en los más simples programas de perforación y de fluidos de perforación y también en los más sofisticados
- El empleo de fluidos de perforación permite la creación de la costra filtrante en las paredes del pozo, necesaria para los sondeos y registros geofísicos
- No es necesario introducir ademe para sostener las paredes del pozo, dado que se sostienen por la presión del fluido de perforación

Limitaciones de la perforación rotaria con circulación directa

- Dificultad para remover los fluidos de perforación y la costra filtrante durante el desarrollo del pozo cuando se excede el perímetro de influencia
- Los fluidos de perforación y sus aditivos influyen en la calidad del agua subterránea
- Las muestras que se obtienen son cortes de dimensiones pequeñas que no permiten una buena interpretación de las formaciones que se han perforado
- Los costos de muestreo por un método adicional se incrementan notablemente, sobre todo a partir de profundidades mayores a los 45 m. Es difícil identificar los horizontes acuíferos. La invasión de fluidos de perforación, principalmente en las zonas permeables, puede contaminarlas y provocar interpretaciones erróneas, así como reducir su permeabilidad de manera irreversible
- La transportación del equipo requiere en algunos casos de vehículos y grúas especiales, lo cual complica su empleo en terrenos de difícil acceso o de topografía accidentada

4.2.7. PERFORACIÓN CON DOBLE TUBERÍA Y CIRCULACIÓN INVERSA

En este sistema, la circulación se inicia con el bombeo del fluido al interior del pozo a través del espacio abierto localizado entre la tubería interior y la tubería exterior, que actúa como ademe. El fluido regresa a la superficie del terreno, circulando en la tubería interior (Ilustración 4.17).

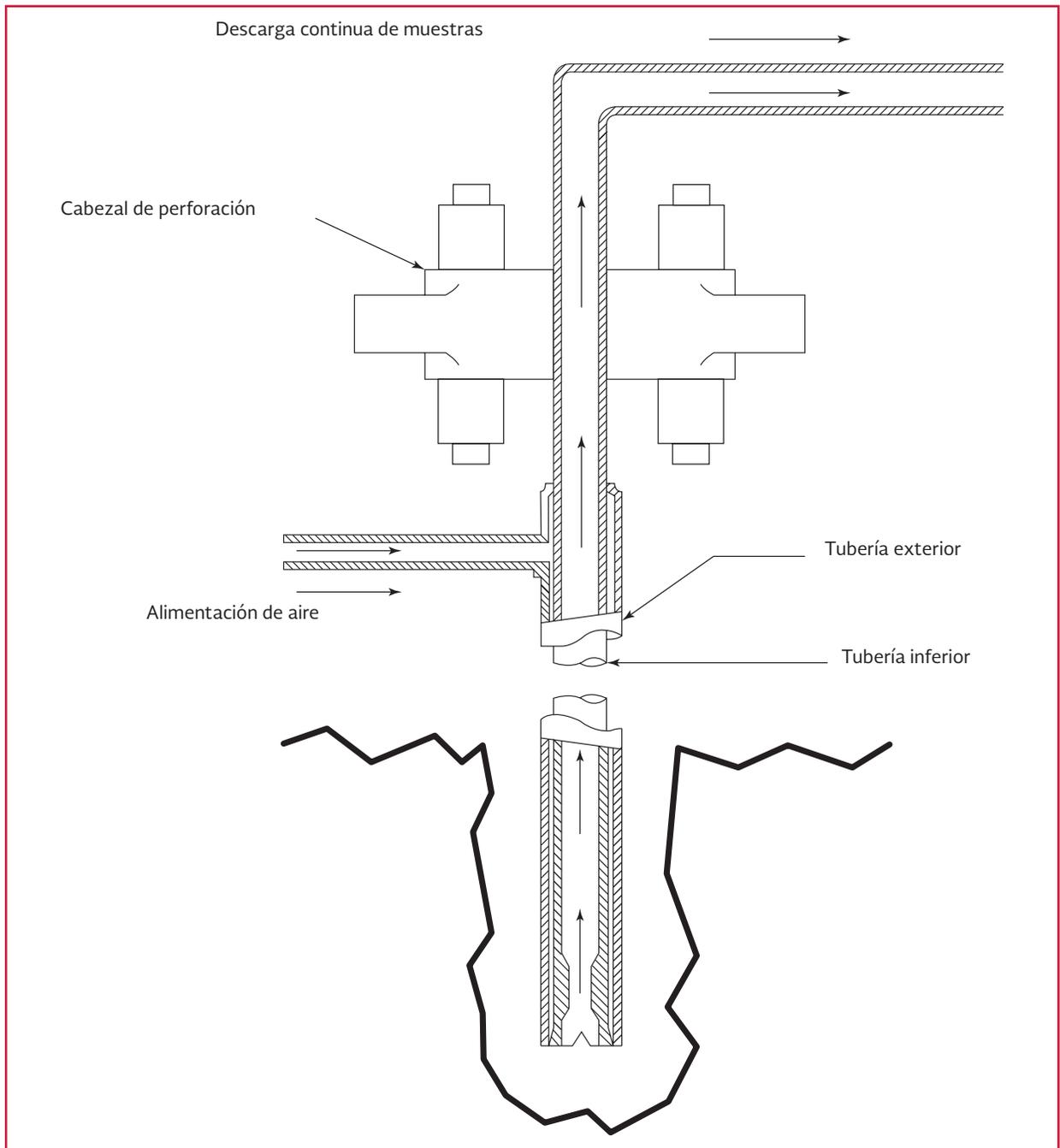
El fluido empleado en este método puede ser agua o aire. La tubería interior o de perforación gira junto con la barrena, mientras que la tubería exterior actúa como ademe. De manera muy similar al método de rotación con aire a compresión y ademe a percusión, la tubería exterior cumple las siguientes funciones:

- Estabiliza las paredes del pozo
- Minimiza la contaminación de los cortes al pasar por las zonas perforadas
- Evita la contaminación entre acuíferos perforados en niveles someros

Esta técnica es una de los mejores para obtener un muestreo continuo y representativo de las formaciones que se perforan. Si la barrena de perforación es de tipo tricónica, los cortes observados en la superficie del pozo pertenecen a formaciones localizadas a unos centímetros (aproximadamente 30) del resto de la doble tubería, en el preciso instante en que son vistos. Estos representan tan solo una pequeña parte del espesor total real de las formaciones perforadas. Cuando se perfora con aire, es posible obtener muestras representativas aun de formaciones delgadas y las manifestaciones de la presencia de agua son fácilmente distinguibles. Los muestreos de agua pueden realizarse siempre y cuando las formaciones acuosas cuenten con la suficiente presión hidrostática como para vencer la presión del aire empleado como fluido de perforación, así como la deshidratación y la capacidad de sello del polvo provocado durante la perforación.

Las formaciones no consolidadas pueden ser penetradas rápidamente mediante este método. Las formaciones que contienen guijarros y blo-

Ilustración 4.17 Perforación rotaria con doble tubería y circulación inversa



ques o grava gruesa, así como otros materiales que se consideran de difícil perforación, pueden ser fácilmente atravesadas con esta técnica. El incremento en la eficiencia de este método consiste en su habilidad para maximizar la energía en la parte inferior del pozo y la eliminación de

los problemas de pérdida de fluidos en su circulación, así como en la estabilidad de las paredes del pozo.

Cuando se perfora en roca dura, la barrena triconica puede ser reemplazada por un martillo

neumático instalado en el interior del pozo. En este martillo, el aire actúa permitiendo el movimiento descendente y de golpeteo del martillo sobre la formación a perforar. Este método fue desarrollado en la exploración minera, en la que es ampliamente utilizado. Con él se han alcanzado profundidades superiores a los 300 m en diversos tipos de formaciones. En la perforación de pozos de agua es de empleo reciente.

Cuando se utiliza aire como fluido de perforación, se pueden introducir algunas impurezas dentro de las formaciones perforadas, como aceite. Por ello, cuando se emplea barrena tricónica, se debe instalar un filtro en el ducto alimentador de aire que retenga todas estas impurezas. Cuando se perfora con martillo neumático no se debe eliminar el aceite, dado que sirve para lubricar el martillo.

Aplicaciones de la perforación con doble tubería y circulación inversa

- Permite la rápida perforación de formaciones consolidadas y no consolidadas
- Permite el muestreo continuo en todo tipo de formaciones
- Se obtienen muestras representativas con una mínima probabilidad de contaminación. Lo mismo sucede con el muestreo de agua
- En formaciones estables, los pozos perforados con diámetros de hasta 6" pueden ser instalados a pozo abierto

Limitaciones

- El diámetro de perforación es reducido
- En formaciones inestables el diámetro máximo de perforación es de 4"

- El equipo de perforación no está distribuido ampliamente
- El empleo del aire como fluido de perforación puede modificar las condiciones tanto biológicas como químicas de las formaciones atravesadas difíciles de recuperar

4.3. FLUIDOS Y ADITIVOS DE PERFORACIÓN

La tecnología de los fluidos de perforación ha avanzado tan rápido y tan ampliamente como han evolucionado las máquinas perforadoras rotarias. En el siglo pasado, el agua fue el principal fluido usado en la perforación rotaria, sumándose con el paso del tiempo, el empleo de arcillas naturales en unión con el agua. En general, el término lodo, originado cuando se empleaban agua y arcillas, en la actualidad es obsoleto. En los sistemas modernos los lodos son llamados fluidos de perforación debido al gran número de aditivos que pueden ser usados para proporcionar propiedades especiales a estos fluidos.

Mucho del progreso en el desarrollo de los fluidos de perforación se ha desplegado en la industria petrolera, utilizándose considerablemente en la geohidrología. Actualmente, los sistemas de fluidos de perforación pueden tener un costo elevado en las perforaciones profundas, aunque esto depende en gran medida de la habilidad del perforista para controlar las características físicas del fluido, de acuerdo a las situaciones que se presenten en la perforación del pozo.

4.3.1. TIPOS DE FLUIDOS

Los fluidos de perforación empleados en la perforación de pozos de agua incluyen los de base

agua y los que contienen aire principalmente. Los primeros consisten en una fase líquida que contiene partículas en suspensión (coloide) y arrastra esquilas durante la perforación. El volumen de la fase coloidal puede oscilar desde menos 1 por ciento hasta 50 por ciento del volumen total. Los fluidos basados en aire pueden consistir en una fase de aire seco solamente o en esta misma fase adicionada de agua con surfactante, para producir espuma.

Ocasionalmente se pueden añadir pequeñas cantidades de arcilla o de polímeros, además de una gran variedad de aditivos adicionales que permiten modificar las propiedades físicas y químicas del fluido de acuerdo a los requerimientos necesarios.

Las arcillas y los polímeros son los aditivos más usados en los fluidos de base agua y los surfactantes y ocasionalmente las arcillas o los polímeros, en los fluidos de base aire.

El agua con arcilla como aditivo produce un fluido de perforación con una gran cantidad de sólidos en suspensión, mientras que combinada con polímeros, tiene una cantidad de sólidos mucho menor. Además de estos, se pueden encontrar muchos aditivos especiales tales como los floculantes, los dispersantes, los materiales pesados, los anticorrosivos, los reductores de filtración, los lubricantes, los preservativos, los bactericidas y los materiales para evitar la pérdida de circulación; todos ellos se emplean para ajustar las propiedades del fluido de perforación. En la perforación de pozos de agua, el término fluido de perforación se refiere al agua exclusivamente, al aire seco, a una suspensión líquida con sólidos, a una mezcla de agua y surfactante o a una mezcla de agua, surfactante y coloides inmersos

en aire (anexo A: aditivos de perforación).

La selección del sistema adecuado de fluidos de perforación depende principalmente de dos aspectos:

- La formación o estratigrafía que se espera atravesar
- El equipo disponible

La accesibilidad al sitio de perforación, la disponibilidad del equipo de perforación y de agua, el impacto ambiental de la perforación y la experiencia del perforista, juegan un papel muy importante en la selección tanto del sistema de perforación como del fluido que se emplee. La perforación en rocas duras, por ejemplo, requiere un procedimiento diferente al empleado al perforar rocas sedimentadas o materiales no consolidados.

Los fluidos con base en agua adicionada con arcillas o polímeros se emplean típicamente en la perforación de formaciones no consolidadas. El aire es usado en rocas consolidadas o semi-consolidadas y el agua sola, en pozos de diámetro grande, en equipos de rotación inversa y en sedimentos no consolidados, consolidados y combinados. El éxito en el uso de un sistema de fluidos de perforación en particular, depende principalmente de sus características químicas, de los aditivos seleccionados, de las características del agua y de los fragmentos rocosos perforados.

4.3.2. IMPACTO DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

La construcción de pozos de agua está limitada a emplear fluidos de perforación cuya base es agua

pura. Esta limitante se deriva de la necesidad de que el fluido no afecte la calidad del agua subterránea. Cuando se emplean otro tipo de fluidos, se pueden presentar muchos problemas:

- Infiltración de fluido/desalojo en la zona de monitoreo
- Dificultades en el desarrollo del pozo (principalmente cuando se ha instalado un filtro artificial)
- Reacciones químicas, biológicas y físicas con los fluidos naturales de las formaciones perforadas

Como los fluidos están circulando en el pozo durante la perforación, una cierta cantidad de ellos se introduce en las formaciones, principalmente en aquellas cuya permeabilidad es más elevada, inhibiendo una propiedad cuyo interés es primordial, por ello su empleo debe medirse adecuadamente. Por otro lado, si el fluido de perforación y el fluido natural de la formación tienen propiedades químicas diferentes, se producen reacciones que afectan la calidad del agua.

Esto es evidente cuando se miden en campo algunas propiedades fisicoquímicas del agua, tales como la conductividad, la temperatura y el potencial hidrógeno, por ello, para considerar una muestra de agua como representativa del acuífero, se deja fluir una buena cantidad de agua y se colecta la muestra cuando se considera que los fluidos de perforación y su efecto han migrado o cuando tras efectuar medidas periódicas de las propiedades fisicoquímicas del agua, estas se han estabilizado en un cierto valor.

No obstante, con la perforación se producen efectos diversos, como el provocar la precipita-

ción de minerales o el inhibir la capacidad de solvente del agua, que no pueden ser evaluados y que resultan de la acción del fluido de perforación y sus aditivos en el agua subterránea.

Se puede producir un efecto semejante en el contenido microbiológico del agua subterránea, principalmente al emplear compuestos orgánicos como aditivo, como los polímeros, que afectan la actividad orgánica, provocando con ello una variación en la calidad del agua.

Por lo que respecta a los problemas surgidos en el desarrollo de los pozos, todo el lodo que ha sido desplazado hacia la formación, debe ser eliminado de los poros de esta. Si no se hace así, el material granular del acuífero permanecerá parcialmente obstruido, dando por resultado un pozo ineficiente.

Es necesario que los perforistas preparen un fluido que produzca el efecto de sellado, pero con muy poca invasión dentro de la formación y que además no sea muy viscoso para poderlo bombear con equipo convencional.

4.3.3. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Las principales propiedades de los fluidos de perforación son: densidad, viscosidad, consistencia gelatinosa, propiedad filtrante, contenido de arena, punto de cambio y capacidad lubricante.

La densidad, viscosidad y contenido de arena se deben evaluar en el sitio de la obra, para tener una base que permita regular el lodo durante la perforación. Para conocer la densidad y la viscosidad del fluido, el perforista cuenta con dos equipos auxiliares: una balanza para determi-

nar la densidad del lodo y un embudo Marsh para medir su velocidad.

La balanza tiene una taza en un extremo y un peso deslizante en la otra porción de su barra. El peso se mueve hasta que equilibra la taza llena con el fluido de perforación. La densidad del fluido se lee en el brazo graduado de la balanza. Para la mayoría de las perforaciones de pozos de agua, suele ser satisfactorio un fluido con densidad de aproximadamente 10.78 N/L (1.1 kg/L o 9 lb por gal). La retención excesiva de arena y demás materiales provenientes de las formaciones perforadas, podría aumentar la densidad del fluido hasta niveles muy elevados, por ello es necesaria una constante revisión.

La Ilustración 4.18 muestra los diferentes tipos de fluidos de perforación y el intervalo de densidades que pueden alcanzar.

Para determinar la viscosidad en el embudo Marsh, se tapa con un dedo el extremo inferior mientras se llena hasta el nivel apropiado

(un volumen de 1.5 L). Después, se separa el dedo para permitir que descargue el fluido desde el embudo. El tiempo requerido para descargar un litro del líquido se define como la viscosidad por embudo Marsh expresada en segundos.

Un buen fluido de perforación con una densidad de 10.59 N/L (1.08 kg/L) tiene, según el embudo de Marsh, una viscosidad correspondiente a un intervalo de 35 a 45 segundos.

La Tabla 4.1 muestra las viscosidades por embudo de Marsh requeridas para la perforación en materiales no consolidados.

El agua y los aditivos deben agregarse periódicamente al fluido de perforación, según sea necesario, para mantener la densidad y la viscosidad dentro de los límites mencionados.

La Ilustración 4.19 muestra el efecto que se produce en la bentonita sódica al mezclarse con el agua. Esta figura muestra la variación de la vis-

Ilustración 4.18 Densidad de los fluidos de perforación

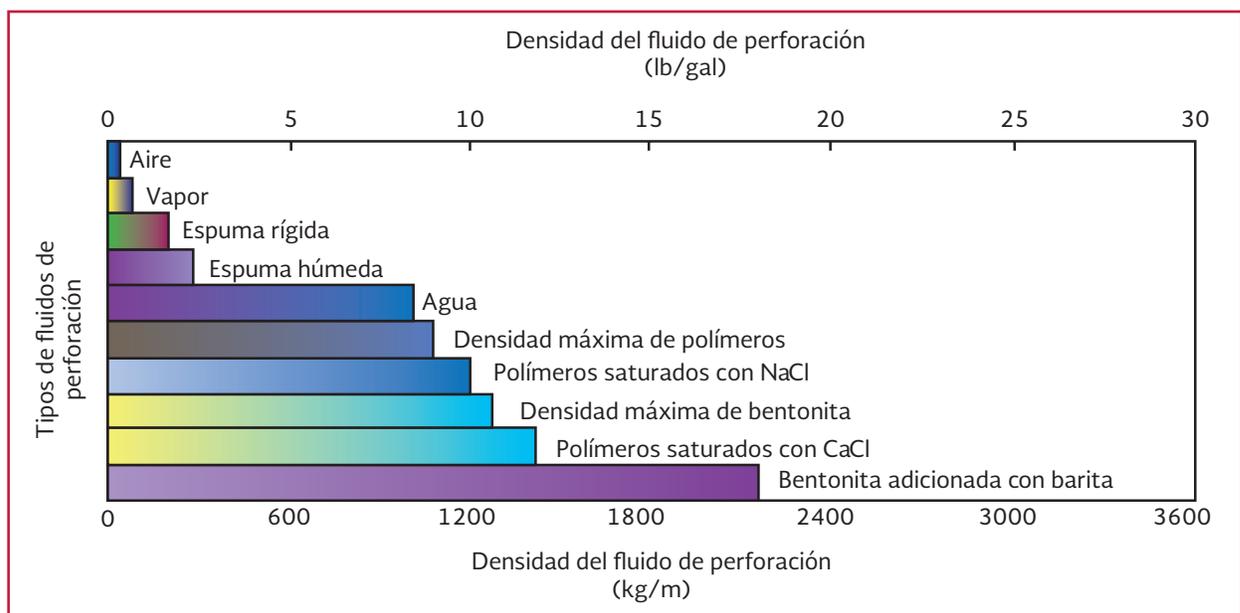


Tabla 4.1 Viscosidades por Embudo de Marsh para perforar materiales no consolidados

| Material | Viscosidad (S) |
|--------------|----------------|
| Arena Fina | 36-46 |
| Arena Media | 46-56 |
| Arena Gruesa | 56-66 |
| Grava | 66-76 |
| Grava Gruesa | 76-86 |

cosidad como resultado de emplear agua suave contra agua dura en la preparación del fluido de perforación.

El punto de cambio y la consistencia gelatinosa son dos propiedades adicionales que se consideran en la evaluación de las características de un lodo de perforación. El punto de cambio es una medida de la cantidad de presión que se necesita para que una partícula pueda fluir al iniciarse el bombeo. La consistencia gelatinosa es una medida de la capacidad del fluido de perforación para mantener en suspensión las partículas arrancadas en la perforación. Ambas propiedades mantienen una cerrada relación con la viscosidad. En general, estas propiedades son raramente controladas debido a que su manejo requiere de la adición de aditivos que pueden impactar la calidad del agua.

4.3.4. FUNCIONES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Los fluidos de perforación pueden desempeñar varias funciones, dependiendo de las condiciones físicas y químicas que se encuentren en la perforación de los pozos.

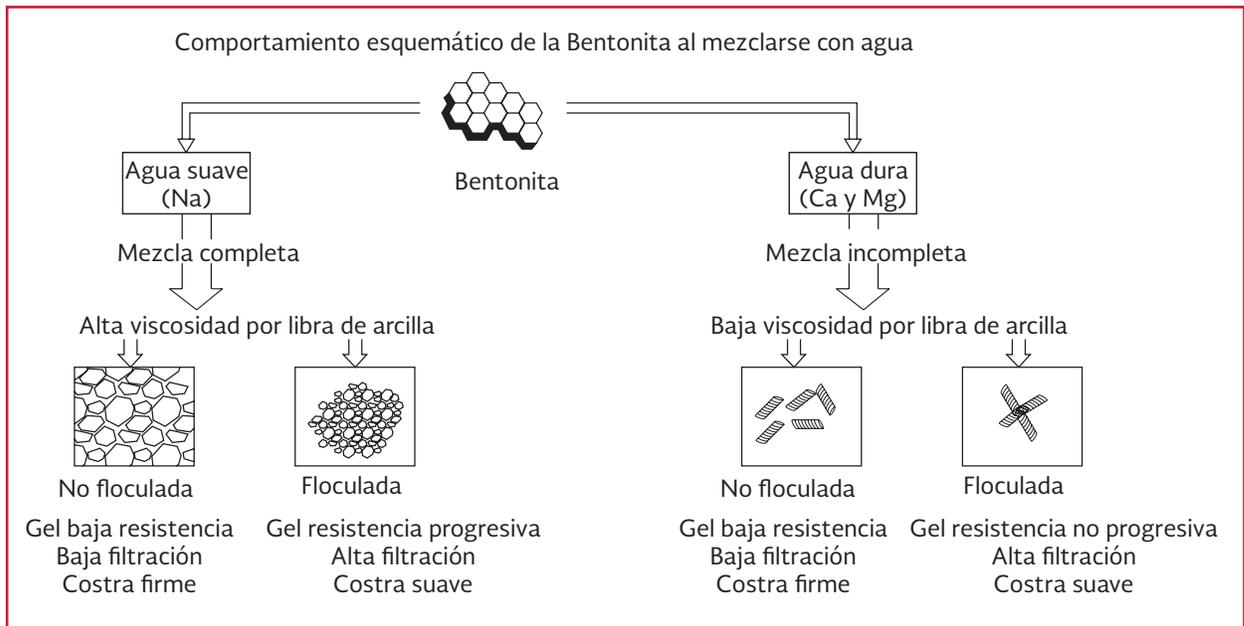
4.3.4.1. Remover las esquirlas del fondo del pozo

Uno de los propósitos fundamentales de los fluidos de perforación es remover las esquirlas del fondo del pozo durante la perforación. La cantidad y características de las esquirlas que pueden ser removidas dependen de la viscosidad, densidad y velocidad de ascenso del fluido de perforación, así como del tamaño, peso y rugosidad de los fragmentos rocosos.

El fluido de perforación al moverse hacia arriba y afuera del pozo, eleva los cortes hasta la superficie.

En la superficie, el fluido corre por una zanja apropiada hacia una fosa de asentamiento donde se depositan los cortes. De aquí se derrama a una fosa de almacenamiento donde nuevamente se eleva para recircular por medio de la bomba. Una remoción ineficiente de los cortes puede reducir el intervalo de perforación y de vida útil de la barrena y afectar las propiedades físicas del fluido e incrementar la energía necesaria para recircularlo.

Ilustración 4.19 Comportamiento de la bentonita en el agua



4.3.4.2. Proteger y estabilizar las paredes del pozo

El fluido de perforación retiene las paredes del pozo y evita su socavamiento, mediante la presión que ejerce sobre las paredes del mismo. No existe ninguna fórmula matemática que permita calcular la presión que tendería a derrumbar el pozo rodeado por diversos materiales a varias profundidades. El peso del lodo que se necesita no se puede predecir con exactitud. En la práctica, el perforista se basa en su experiencia para preparar el fluido.

4.3.4.3. Enfriar y limpiar la barrena de perforación

El enfriamiento y la limpieza de la barrena se efectúan mediante los chorros de fluido que son dirigidos a velocidad relativamente alta hacia las caras cortantes y el cuerpo de la barrena. Un fluido de perforación preparado adecuadamente

constituye además un lubricante excelente para la perforadora, para la bomba de lodos y para la tubería de perforación, lo que redundará en un aumento de la vida útil de la barrena y una disminución de los gastos por mantenimiento.

4.3.4.4. Sellar las paredes del pozo

En todos los sistemas de fluidos de perforación se debe tener la capacidad de controlar las pérdidas de fluidos en formaciones altamente permeables, creando para ello una costra filtrante de arcillas o una película de polímeros sobre las paredes del pozo. En un intento por controlar la pérdida de fluidos, algunos perforistas han mezclado fluidos con una alta cantidad de sólidos en circulación a alta presión, de tal manera que grandes volúmenes de fluido son forzados a penetrar en las zonas permeables. A este procedimiento se le ha denominado *self induced fluid loss*. Las propiedades del fluido que permiten constituir la pared filtrante incluyen la viscosidad, la densidad y la consistencia gelatinosa.

El espesor del filtro (costra filtrante) depende de la capacidad de las arcillas que forman el fluido para perder agua y de la diferencia de presión del fluido dentro del pozo. Así, si el agua es expulsada rápidamente, se forma un filtro muy grueso que puede tener efectos contraproducentes en el desarrollo de la formación de pozo.

4.3.4.5. Mantener los cortes y los fragmentos de la formación en suspensión

La capacidad de un fluido para mantener las partículas en suspensión crece rápidamente conforme la velocidad y su viscosidad aumentan. Después de que los cortes son llevados a la superficie, es esencial que sean separados del lodo conforme el fluido se desplaza por la fosa de sedimentación a una velocidad reducida. Los resultados que se desean se obtienen mediante la regulación de la viscosidad y el peso del lodo, ajustando la velocidad de bombeo y proporcionando a la fosa de sedimentación la forma adecuada. Un buen fluido de perforación puede mantener partículas en suspensión, puesto que desarrolla cierta consistencia gelatinosa cuando la circulación se hace más lenta o se detiene.

4.3.4.6. Facilitar la obtención de información del subsuelo

Los sistemas de fluidos de perforación facilitan la obtención de cortes representativos de las formaciones perforadas, que permiten calibrar la interpretación de los registros geofísicos del pozo.

4.3.5. ADITIVOS DE PERFORACIÓN

Hay una gran cantidad de aditivos que pueden ser adicionados al agua o al aire y que se emplean con un fin específico en la perforación. Esta diversidad se empezó a desarrollar a partir de 1940, de acuerdo a las crecientes necesidades de la industria petrolera. En la perforación de los pozos productores de agua, la gama de aditivos es mucho más reducida que en la industria del petróleo. Algunas características de aditivos que se pueden mezclar tanto con el agua como con el aire se presentan en la Tabla 4.2, así como otras propiedades de importancia.

En la Tabla 4.3 se presentan los principales productos aditivos de cuatro empresas dedicadas a su elaboración y algunas de sus aplicaciones. Una información más detallada puede consultarse en el anexo A: aditivos de perforación

4.4. EQUIPO DISPONIBLE EN EL MERCADO NACIONAL

En nuestro país se puede encontrar una buena cantidad de equipos de perforación y los aditamentos necesarios para su buen desempeño. Evidentemente tal disponibilidad responde a la presencia de las compañías extranjeras que cuentan con sucursales en México. Es un hecho que aunque la variedad y cantidad de equipo no es similar a la existente en Estados Unidos, en nuestro país se cuenta con buenos equipos.

El equipo disponible en México incluye una gran variedad de accesorios, desde máquinas

Tabla 4.2 Concentraciones normales, viscosidades y velocidades de ascenso de los principales tipos de fluidos de perforación

| Fluido base | Aditivo y concentración kg/L | Viscosidad embudo Marsh (s) | Velocidad de ascenso (m/min) | Observaciones |
|-------------|---|-------------------------------|-------------------------------|---|
| Agua | Ninguna | 26 + - 0.5 | 30 - 36 | Para perforación normal (arena, arcilla y limos) |
| Agua | Arcilla (bentonita de alta calidad) 6.8-11.3 kg/378.5 L 11.3-18 kg/378.5 L 15.8-20.4 kg/378.5 L | 35 - 55 65 - 70 75 - 85 | 24 - 36 24 - 36 24 - 36 | Incrementa significativamente la viscosidad del agua para la perforación normal (arenas, limos y arcillas) para gravas y otras formaciones de grano grueso y pobremente consolidadas para perdidas excesivas de fluidos |
| Agua | Polímero (natural) 1.8 kg/378.5 L 2.8 kg/378.5 L 2.9 kg/378.5 L | 35 ~ 55 65 - 75 75 - 85 | 24 - 36 24 - 36 24 - 36 | Incrementa significativamente la viscosidad del agua. Para la perforación normal (arena, limos y arcillas), para gravas y otras formaciones de grano grueso y pobremente consolidadas. Para la perdida excesiva de fluidos, los cortes pueden ser removidos a través del espacio anular. El fluido es bombeado rápidamente hacia el pozo debido a que los polímeros tienen una consistencia gelatinosa poco rígida |
| Aire | Ninguno | | 914 - 1524 1371 - 1828 | Para perforación rápida y una adecuada limpieza de cortes de finos y medios. No obstante, puede provocar problemas en la superficie por la producción excesiva de polvo. La velocidad de ascenso que se requiere se logra por el método de doble tubería |
| Aire | Agua (brisa) 0.015 - 0.13 L/s | | 914 - 1524 | Controla el polvo en la superficie y es apropiado para formaciones que presentan una entrada limitada de agua |
| Aire | Surfactante por ciento agua (aire-espuma) 0.25 - 0.50 por ciento surfactante 0.50 - 0.75 por ciento surfactante 0.75 - 1.00 por ciento surfactante | | 15 - 304 | Aumenta la capacidad de levantamiento de cortes del compresor para perforación ligera; pequeño flujo de agua, además para arcillas plásticas, arenas húmedas, grava fina, roca dura, perforación poco problemática para condiciones promedio de perforación: diámetros grandes, profundidad grande, cortes grandes; incremento del volumen del agua que provoca una excelente limpieza del pozo para perforación difícil; pozos de diámetro y profundidades grandes, cortes pesados; formaciones viscosas e incompetentes intervalos de inyección de la mezcla agua-surfactante no consolidados 11.3 - 37.8 lpm rocas fracturadas 11.3 - 24.5 lpm rocas solidas 11.3 - 19 lpm |
| Aire | Surfactante-coloides-agua (espuma rígida) 0.75 - 1.00 por ciento surfactante mas 1.4 - 2.8 kg polímero/378.5 L O 13.6 - 22.7 kg bentonita/378.5 L 1 - 2 por ciento surfactante mas 1.4 - 2.8 kg polímero/378.5 L O 13.6 - 22.5 kg bentonita/378.5 L | | 15 - 30 | Gran capacidad de levantamiento de cortes. Para perforación difícil con pozos de diámetro y profundidades grandes. Cortes grandes y pesados para perforación extremadamente difícil. Perdida de circulación, formaciones incompetentes |

perforadoras completas, en sus diferentes tipos y para diversos usos, hasta pequeños implementos útiles en partes específicas de la maquinaria. Además, se cuenta con equipos de muestreo y compuestos químicos que se emplean como adi-

tivos a los fluidos de perforación. Una serie amplia de barrenas, tanto tricónicas como ciegas, coronas y martillos, se encuentran al alcance del usuario, cada una diseñada para cumplir un fin específico.

Tabla 4.3 Comparativa de aditivos de perforación por marcas

| Descripción | Imco services | Baroid | Magcobar | Johnson | Aplicaciones |
|---|--------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---------|---|
| Aditivos para aumento de densidad y viscosidad | | | | | |
| Bentonita | Imco gel | Aquegel | Magcogel | | Para fluidos base agua, controlan la viscosidad y la filtración. Para partículas grandes y para control de viscosidad y de filtración, viscosificador en agua salada. Alta viscosidad en agua pura con un tratamiento químico mínimo |
| Subbentonita | Imco klay | Baroco | Hig yield | | |
| Attapulgita | Imco brinegel | Zeogel | Blended clay | | |
| Bentonita beneficiada | Imco hyb | Quik-gel | Salt gel | | |
| Kwik-thik | | | | | |
| Polímeros | | | | | |
| Polímero natural orgánico | | | | | Para fluidos base agua, ligeros. Bajos en sólidos y para control de la viscosidad y filtración |
| Polímero sintético orgánico | | E-z mud | | Revert | Para fluidos base agua, ligeros, bajos en sólidos y para control de la viscosidad y filtración Hecho con aditivos bentoníticos |
| Agentes espumizantes Tetra pirofosfato de sodio Pirofosfato de sodio acida | Imco foamont imco phos Sapp | Quik-foam barafos Sapp | Magco rapid foam Magco-phos sapp | J-foam | Empleado en perforación con aire, incrementa la capacidad limpiadora y reduce el trabajo del compresor Diluyente para fluidos 13 base agua con aditivos arcillosos Para contaminación en los fluidos, hecho con aditivos arcillosos |
| Detergentes | | | | | |
| Detergentes | Imco md | Con det | D-d | | Empleados en fluidos base agua, hecho con aditivos arcillosos, reduce el esfuerzo y minimiza el desgaste de la barrena |
| Bactericidas | | | | | |
| Paraformaldeido | Imco preservoid | Aldecide | My-lo-jel preservative | | Aditivos orgánicos que previenen la degradación |
| Químicos varios | | | | | |
| Hidróxido de sodio(NaOH) Cloruro de sodio(NaCl) cloruro de Calcio(CaCl) Espumizantes | Sosa cáustica sal | Sosa cáustica sal | Sosa cáustica sal | | Para control del pH el fluido base agua Para incrementar peso ligeramente en fluidos base agua |

4.5. TABLAS COMPARATIVAS DE LOS MÉTODOS DE PERFORACIÓN

4.5.1. PROPÓSITO DE LAS TABLAS

En vista de que no hay un solo método de perforación que sea 100 por ciento aplicable de manera eficiente en cualquier tipo de terreno, el método más apropiado en un sitio específico puede determinarse evaluando las características hidrogeológicas del sitio y definiendo con precisión el objetivo que se persigue. Para auxiliar al usuario en la selección de la técnica de perforación más adecuada, se elaboró el anexo B, en el que se presenta una lista de los métodos más comunes de perforación y de los criterios principales para evaluarlos. Cada tabla indica ciertas características hidrogeológicas y para ello, se califica cada método, según los criterios principales, en una escala del 1 al 10. La suma de las calificaciones del método bajo cada criterio, representa el grado de confiabilidad de los métodos de perforación para las condiciones hidrogeológicas específicamente marcadas. Las letras NA indican que el método no es aplicable, o que no cuenta con calificación.

4.5.2. DESCRIPCIÓN DE LAS TABLAS

En total se elaboraron 28 tablas que fueron diseñadas pensando en las condiciones hidrogeológicas más comunes, en las que se incluyen cinco factores:

- La presencia de una formación consolidada o no consolidada

- La formación o no saturada (acuífero)
- Que se permita o no la invasión de fluidos de perforación en la zona de monitoreo
- Los intervalos de profundidad de los pozos, 4.5 a 45 m o más de 45 metros
- Que el diámetro del ademe sea de 5.08 a 20.32 cm (2" a 8") o mayores

Las técnicas y los métodos de perforación han sido evaluados conforme a los siguientes criterios:

- Versatilidad del método de perforación
- Capacidad o confiabilidad del muestreo
- Costo relativo
- Disponibilidad del equipo
- Tiempo relativo que se emplea para instalar el equipo
- Capacidad del método para preservar las condiciones naturales
- Capacidad para la terminación del pozo diseñado
- Facilidad relativa para la terminación y el desarrollo del pozo

4.5.3. INTERPRETACIÓN DE LAS TABLAS

El valor indicado en la columna de total representa la confiabilidad relativa de cada método de perforación para las condiciones indicadas. El valor más alto manifiesta el método más apropiado. Cuando los valores son casi iguales en dos o más métodos, o la diferencia no es muy grande, se puede decir que los métodos son igualmente recomendables.

Los valores no deben compararse entre tablas, dado que pertenecen a condiciones hidrogeológicas diferentes.

Se puede reconsiderar el método recomendado por las tablas, sobre todo en términos de costo y de disponibilidad del equipo necesario, por lo que se puede seleccionar otro método en lugar del recomendado. Además, la selección estará supeditada a las características del usuario y al lugar de perforación.

Una comparación adicional entre los diferentes métodos de perforación, en lo referente a su comportamiento en diferentes tipos de formaciones, se muestra en la Tabla 4.4. En ella se incluyen calificaciones de la velocidad de

perforación en cada terreno. De esta forma el usuario puede, de acuerdo a sus necesidades particulares, considerar la utilización de determinado método de perforación:

1. Imposible
2. Difícil
3. Lento
4. Medio
5. Rápido
6. Muy Rápido
7. NR No Recomendable

Tabla 4.4 Funcionamiento relativo de los métodos de perforación de diferentes tipos de formaciones geológicas

| Tipo de formación | Cable y herramientas | Rotatoria circulación directa (con fluidos) | Rotatoria circulación directa (con aire) | Rotatoria circulación directa con martillo interior | Rotatoria circulación directa a través de ademe |
|---|----------------------|---|--|---|---|
| Dunas de arena | 2 | 5 | NR | NR | 6 |
| Arenas sueltas y grava | 2 | 5 | NR | NR | 6 |
| Arenas movedizas | 2 | 5 | NR | NR | 6 |
| Bloque rocosos inmersos en material aluvial | 3 a 2 | 3 a 2 | NR | NR | 5 |
| Limos y arcillas | 3 | 5 | NR | NR | 5 |
| Lutita firme | 5 | 5 | NR | NR | 5 |
| Lutita | 3 | 5 | NR | NR | 5 |
| Lutita, quebradiza | 5 | 5 | NR | NR | 5 |
| Arenisca pobremente cementada | 3 | 4 | NR | NR | NR |
| Arenisca fuertemente cementada | 3 | 3 | 5 | NR | NR |
| Nódulos de pedernal | 5 | 3 | 3 | NR | NR |
| Caliza | 5 | 5 | 5 | NR | NR |
| Caliza con nódulos de pedernal | 5 | 3 | 5 | NR | NR |
| Caliza con pequeñas cavernas y fracturas | 5 | 3 | 5 | NR | NR |

Tabla 4.4 Funcionamiento relativo de los métodos de perforación de diferentes tipos de formaciones geológicas (continuación)

| Tipo de formación | Cable y herramientas | Rotatoria circulación directa (con fluidos) | Rotatoria circulación directa (con aire) | Rotatoria circulación directa con martillo interior | Rotatoria circulación directa a través de ademe |
|--|----------------------|---|--|---|---|
| Caliza karstica | 5 | 3 a 1 | 2 | NR | NR |
| Dolomita | 5 | 5 | 5 | 6 | NR |
| Basaltos en capas delgadas dentro de rocas sedimentarias | 5 | 3 | 5 | 5 | NR |
| Basaltos en colados gruesos | 5 | 3 | 4 | 6 | NR |
| Basaltos altamente fracturados (perdida de circulación) | 5 | 1 | 3 | 5 | NR |
| Rocas metamórficas | 5 | 3 | 4 | 6 | NR |
| Granito | 5 | 3 | 5 | 6 | NR |

Tabla 4.4 Funcionamiento relativo de los métodos de perforación de diferentes tipos de formaciones geológicas (continuación)

| Tipo de formación | Rotatoria circulación inversa (con fluidos) | Rotatoria circulación inversa con doble tubería | Chorro | Pozo punta | Percusión hidráulica | Tipo taladro |
|---|---|---|--------|------------|----------------------|--------------|
| Arenas movedizas | 5 | 6 | 5 | 4 | 5 | 1 |
| Bloque rocosos inmersos en material aluvial | 2 a 1 | 4 | 1 | NR | 1 | 1 |
| Limos y arcillas | 5 | 5 | 3 | NR | 3 | 3 |
| Lutita firme | 5 | 5 | NR | NR | 3 | 2 |
| Lutita | 3 | 5 | NR | NR | 3 | 2 |
| Lutita quebradiza | 5 | 5 | NR | NR | 3 | NR |
| Arenisca pobremente cementada | 4 | 5 | NR | NR | 4 | NR |
| Arenisca fuertemente cementada | 3 | 5 | NR | NR | 3 | NR |
| Nódulos de pedernal | 3 | 3 | NR | NR | 5 | NR |
| Caliza | 5 | 5 | NR | NR | 5 | NR |
| Caliza con nódulos de pedernal | 3 | 3 | NR | NR | 5 | NR |
| Caliza con pequeñas cavernas y fracturas | 2 | 5 | NR | NR | 5 | NR |
| Caliza kárstica | 1 | 5 | NR | NR | 1 | NR |
| Dolomita | 5 | 5 | NR | NR | 5 | NR |

Tabla 4.4 Funcionamiento relativo de los métodos de perforación de diferentes tipos de formaciones geológicas (continuación)

| Tipo de formación | Rotatoria circulación inversa (con fluidos) | Rotatoria circulación inversa con doble tubería | Chorro | Pozo punta | Percusión hidráulica | Tipo taladro |
|--|---|---|--------|------------|----------------------|--------------|
| Basaltos en capas delgadas dentro de rocas sedimentarias | 3 | 5 | NR | NR | 5 | NR |
| Basaltos en colados gruesos | 3 | 4 | NR | NR | 3 | NR |
| Basaltos altamente fracturados (perdida de circulación) | 1 | 4 | NR | NR | 1 | NR |
| Rocas metamórficas | 3 | 4 | NR | NR | 3 | NR |
| Granito | 3 | 4 | NR | NR | 3 | NR |

5

ETAPA EXPLORATORIA DEL POZO

Debido a la heterogeneidad del subsuelo, aun cuando se disponga de estudios previos, de exploraciones indirectas o de datos de pozos circunvecinos, las condiciones hidrogeológicas presentes en un sitio solo pueden conocerse con detalle mediante una exploración directa. Por ello, cualquiera que sea su objetivo final, todo pozo tiene en principio un carácter exploratorio.

Por medio de las exploraciones directas o de pozos exploratorios, se obtienen datos hidrogeológicos en un sitio dado, que arrojan información de su estratigrafía y litología, la localización y características de acuíferos, los niveles y calidad del agua subterránea, etc. Los objetivos de la exploración pueden ser muy variados, como la prospección o la evaluación geohidrológica, la captación de agua subterránea, el estudio de la inyección de contaminantes al subsuelo y la determinación de la contaminación de un acuífero.

Cuando los objetivos son la captación o la disposición de contaminantes, la información obtenida en la perforación exploratoria permite diseñar su terminación, para convertirla en un pozo de bombeo o de inyección. En este capítulo se describe el procedimiento exploratorio que se sigue cuando el objetivo es la perforación de un pozo de bombeo.

5.1. PERFORACIÓN EXPLORATORIA

La práctica acostumbrada consiste en iniciar la perforación con un diámetro pequeño, de 20.32 a 30.48 cm (8" a 12"), para recabar información acerca de las condiciones hidrogeológicas locales mediante los registros y pruebas del pozo, que son pruebas de penetración, cortes litológicos y registros geofísicos (en el interior del pozo), control de lodos como densidad, conductividad eléctrica, pérdidas y niveles, pruebas de productividad, etcétera.

Todos los registros apuntados se complementan entre sí, por lo que deben ser interpretados conjuntamente. Como resultado, se determina la ubicación, litología y espesor de los acuíferos, la distribución vertical de la carga hidráulica y la calidad del agua que contienen.

5.2. PRUEBAS PRELIMINARES DE PRODUCTIVIDAD

En algunos casos, pueden efectuarse pruebas preliminares de productividad, si la estabilidad de las paredes y el método de perforación lo permiten, para tener una idea de las características hidráu-

licas de los estratos cortados (coeficientes de permeabilidad, transmisividad y almacenamiento).

La información recabada durante la etapa exploratoria permite estimar si es factible captar el caudal requerido aunque la estimación puede ser demasiado incierta para apoyar el diseño de la captación. En todo caso, es conveniente efectuar pruebas hidráulicas para evaluar, en forma preliminar, el caudal que puede aportar el acuífero al pozo y la respuesta de su nivel de agua. Las pruebas preliminares más comunes son el cuchareo, la inyección y el sifoneo.

La prueba de cuchareo se utiliza en pozos perforados con equipo de percusión. Consiste en la extracción de agua del pozo por medio de la cuchara, observando al mismo tiempo el abatimiento de su nivel. El gasto medio de extracción se obtiene con el cociente de la cantidad de agua extraída entre el tiempo de ejecución de la prueba.

En pozos construidos con equipo rotatorio se pueden realizar pruebas de inyección. Previamente, se procede al adelgazamiento del fluido de perforación, siempre que esto no comprometa la estabilidad de las paredes del pozo. La prueba consiste en inyectar agua por la tubería de perforación por medio de la bomba de lodos y se observa la respuesta del nivel de agua.

La prueba de sifoneo con inyección de aire se lleva a cabo por medio de una columna de doble tubería. El aire es inyectado por una tubería de 2.54 cm (1") de diámetro, conectada a un compresor, generalmente de 861.84 a 1723.68 kPa (125 a 250 psi) y el agua es impulsada al exterior por una tubería de 7.6 cm (Y) de diámetro. La línea de aire puede instalarse dentro o fuera de la tubería mayor. Para su adecuado funcio-

namiento, la línea de aire debe estar sumergida como mínimo de 0.45 a 0.65 veces la profundidad del nivel del agua.

Se conoce como caudal específico al resultado de las pruebas que se calcula con la relación entre el caudal extraído y el consiguiente abatimiento del nivel de agua en el interior del pozo, cuyo valor es directamente proporcional a la transmisividad del acuífero.

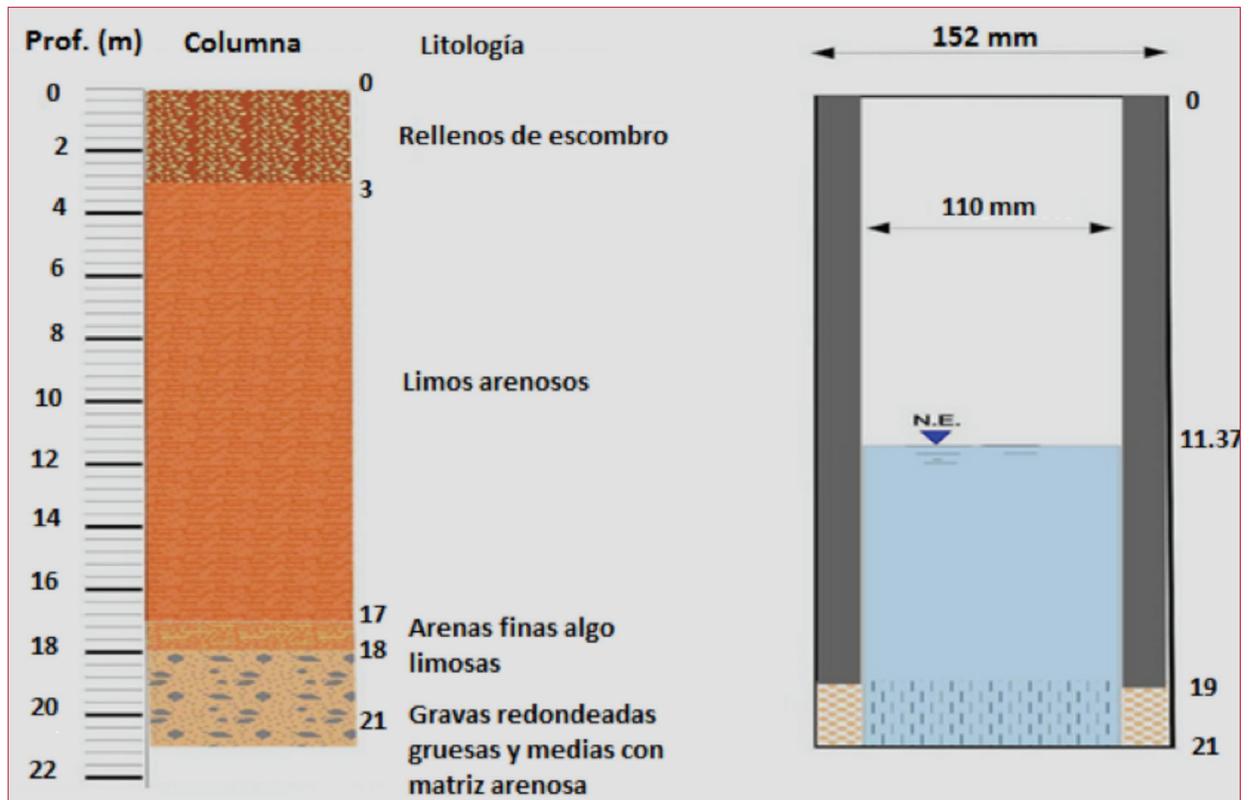
Dado que los gastos bombeados en estas pruebas son pequeños (unos cuantos litros por segundo) sus resultados deben ser tomados con reserva, ya que el caudal específico del pozo decrece con la magnitud del gasto. Asimismo, un rendimiento bajo en las pruebas preliminares no constituye una base suficiente para desechar el pozo, ya que la perforación puede tener efectos adversos en la permeabilidad de los materiales que pueden ser corregidos por medio de las operaciones de limpieza y desarrollo.

5.3. CLASIFICACIÓN DE MUESTRAS

La secuencia estratigráfica en el sitio se representa por medio del corte litológico del pozo, que es trazado gracias a la clasificación de las muestras obtenidas durante la perforación (Ilustración 5.1).

Las muestras colectadas a intervalos de uno a dos metros y en cada cambio de formación se guardan secas y sin lavar en cajitas (de 5 x 5 cm) o bolsas de plástico, anotando en cada una de ellas la profundidad a la que corresponden. Las cajitas o bolsas se almacenan en cajas de cartón grueso, de 25 x 25 x 5 cm, cada una de las cuales contiene el material representativo del corte geológico en una longitud de 25 a 50 metros.

Ilustración 5.1 Corte litológico



Antes de proceder a su clasificación, las muestras se lavan con agua para remover el lodo de perforación, procurando no eliminar el material fino propio de las formaciones. En la descripción de las muestras se debe utilizar una terminología convencional. En algunos casos, el análisis macroscópico o con lente de poco aumento es complementado con un análisis petrográfico a fin de precisar la roca de que se trata.

El análisis debe considerar la textura, el color, el tamaño y la forma de los granos. Las partículas redondeadas son representativas de los materiales no consolidados (clásticos), mientras que las angulosas corresponden a recortes de roca.

Los materiales son también clasificados atendiendo a su dureza a la perforación, como una base para la formulación de las estimaciones de

pago. La clasificación convencional considera tres tipos de material, denominados I, II y III, correspondiendo el primero a los más blandos y el último a los más duros (Tabla 5.1).

5.4. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Al perforar materiales no consolidados (clásticos) es necesario efectuar el análisis granulométrico de las muestras para seleccionar la abertura del cedazo y diseñar las características del filtro de grava.

Con frecuencia, este análisis se omite o es realizado en forma muy simplificada en el sitio de perforación, lo que no es recomendable porque esos factores determinan en gran parte el funcionamiento eficiente y la vida útil del pozo.

Tabla 5.1 Clasificación de suelos y rocas para formular estimaciones de trabajos de perforación

| Material tipo I | Material tipo II | Material tipo III |
|------------------------------|--|--|
| Arcillas | Lutitas | Ortocuarcitas |
| Limos | Limolitas | Metacuarcitas |
| Arenas | Areniscas | Bloques y cantos rodados (mayores a 20 cm) |
| Gravas (menores a 5 cm) | Clásticos gruesos (5 a 20 cm) | Pedernal |
| Creta y tufa | Conglomerados y brechas | Rocas ígneas extrusivas |
| Sanas | 5 | 5 |
| Yeso | Calizas, dolomías y travertinos | Rocas ígneas intrusivas |
| Sanas | 3 | 5 |
| Diatomitas | Anhidrita | Gneis |
| Carbón | Tezontle | Corneanas |
| Cenizas volcánicas | Tobas | |
| Perlita y retinita | Rocas ígneas extrusivas alteradas | |
| Pumita o toba pumíticas | Rocas ígneas intrusivas alteradas | |
| Tocas alteradas | Vidrio volcánico | |
| Rocas metamórficas alteradas | Rocas metamórficas (excepto metacuarcita, gneis y corneanas) | |

El análisis granulométrico tiene por objeto conocer la distribución del tamaño de los granos. El equipo necesario para realizarlo consiste en un horno secador, un juego de mallas y una balanza de precisión. Las mallas están colocadas dentro de un cilindro de acero inoxidable de 203 mm (8”) de diámetro. Los tamices utiliza-

dos para tal fin constan de cinco a ocho mallas. La abertura de la malla se expresa en milímetros o por el número de hilos que tiene por pulgada, y representa el diámetro de la partícula más pequeña retenida por ella. El intervalo común de tamaños comprende de la núm. 6 (3.35 mm) a la núm. 100 (0.15 mm) (Ilustración 5.2).

Ilustración 5.2 Juego de tamices



Las muestras a analizar deben ser representativas de los estratos de material no consolidado. Previamente deben lavarse para remover el fluido de perforación, cuidando de no eliminar el material fino propio de la formación. Posteriormente deben ser secadas y mezcladas. Si la muestra es muy grande, se fracciona con el procedimiento de cuarteo, cuidando que la proporción de tamaños en cada fracción sea similar a la de la muestra original.

Se coloca la muestra en la malla superior (la más abierta) y se agita el cilindro con un movimiento circular y vertical, manualmente o en una máquina vibradora. A continuación, el material retenido en cada malla se pesa, se calculan los pesos retenidos como porcentaje del peso total y se determinan los porcentajes acumulativos retenidos.

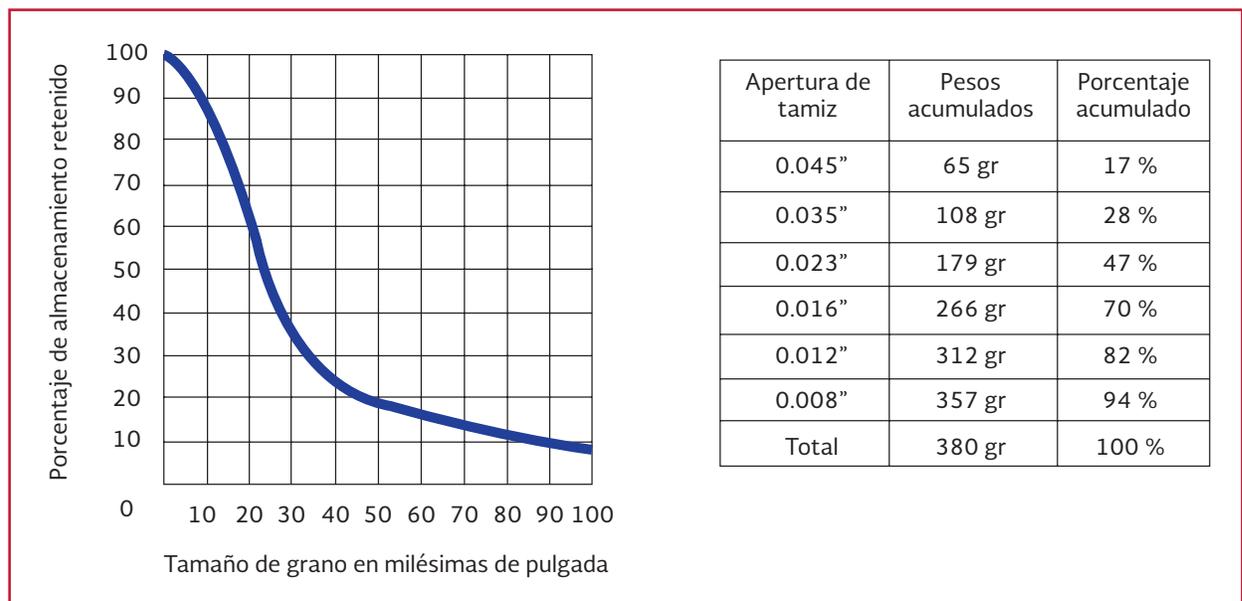
Con los datos obtenidos se traza una gráfica con el porcentaje acumulativo retenido en el eje vertical y la abertura de la malla en el eje horizontal. Las escalas de los ejes suelen ser aritméticas, aunque en ocasiones se utiliza la escala hori-

zontal logarítmica. Los puntos resultantes son unidos con una curva continua (curva granulométrica del material) que indica la fracción de material, menor o mayor, que tiene un tamaño de partícula (Ilustración 5.3).

La distribución granulométrica de un material se expresa en términos de tres factores: el tamaño del grano, la pendiente de su curva granulométrica y la forma de la misma. El tamaño se define utilizando la clasificación convencional de Wentworth o su versión modificada por el USGS, en la cual se asigna un nombre a cada intervalo de tamaños, arena gruesa, gravilla, grava y limo.

En la mayoría de los casos, las curvas granulométricas correspondientes a los materiales aluviales tienen la típica forma S. La pendiente de la porción mayor de la curva, es representada por medio del coeficiente de uniformidad, definido como el cociente de los tamaños correspondientes a 40 y 90 por ciento (porcentajes acumulativos retenidos). Cuanto mayor es el valor de ese coeficiente, más uniforme es el tamaño de

Ilustración 5.3 Curva típica de análisis por tamiz



grano dentro del intervalo apuntado. El valor de este coeficiente se aplica en el diseño del filtro de grava.

Los intervalos de malla para formaciones con arena y grava van desde la núm. 6 a la núm. 48. Para arena gruesa la malla va de la núm. 14 a la núm. 65 y para formaciones con arena fina los números de malla son 28, 35, 48, 65 y 100. Una vez que la muestra es pasada por los tamices se anota el peso de las fracciones retenidas en cada uno de ellos, expresándolos como porcentajes del peso total de la muestra y se traza una gráfica del porcentaje acumulativo de la muestra retenida en una malla, expresada en milésimas de pulgada.

Se dibuja una curva continua con los puntos de la gráfica que ilustra en forma inmediata que porcentaje de material es más pequeño o más grande que un tamaño dado de partícula.

Con la secuencia de estos análisis se establece en forma precisa la selección del tamaño de las aberturas de la rejilla que requiere además del pozo, una vez que se le hayan realizado las ampliaciones correspondientes. Las aberturas de la rejilla del pozo se diseñan para retener de 30 a 50 por ciento del material de la formación acuífera, dependiendo de sus condiciones hidrogeológicas. La selección debe tender hacia el valor más alto de porcentaje para las arenas finas y hacia el valor más bajo para arenas gruesas y gravas que contengan la formación acuífera.

Otro uso interesante de estas curvas es determinar la uniformidad en los tamaños del material granular de la formación acuífera, siendo esta de arenas finas o arenas gruesas y gravas. La Ilustración 5.4a, en la que se muestra una curva casi vertical, indica un material uni-

forme en tamaño y como esta curva ocupa el lado izquierdo de la gráfica, representa una arena fina uniforme con mediana permeabilidad y rendimiento específico. En contraste, si la curva es ampliamente extendida a lo largo de la gráfica (Ilustración 5.4b), indica una mezcla de arena y grava que contiene escasa arena fina. En estas condiciones el material de la formación acuífera tiene una permeabilidad más alta, por consiguiente debe ser mejor productora de agua que el mostrado en la Ilustración 5.4a.

5.5. REGISTROS GEOFÍSICOS EN POZOS

Un registro geofísico de pozo es la medición por métodos indirectos de las propiedades físicas de los materiales (rocas, formaciones) cortados por un pozo exploratorio, en función de su profundidad.

Su aplicación principal a la hidrología de las aguas subterráneas se resume como la determinación litológica, geométrica y de calidad de agua en un sistema acuífero. Por lo tanto, es imprescindible la comprensión de los conceptos teóricos en los cuales se fundamenta el análisis y la interpretación de los registros geofísicos y su interrelación con el medio (Ilustración 5.5).

5.5.1. CONSIDERACIONES PETROFÍSICAS

5.5.1.1. Porosidad

Es la capacidad de un material de contener fluidos y se define como la relación entre el volumen de huecos con el volumen total del material.

Ilustración 5.4 a) Arena fina, uniforme, que suministra agua a velocidades limitadas, b) Mezcla de arena mediana y gruesa con buena permeabilidad

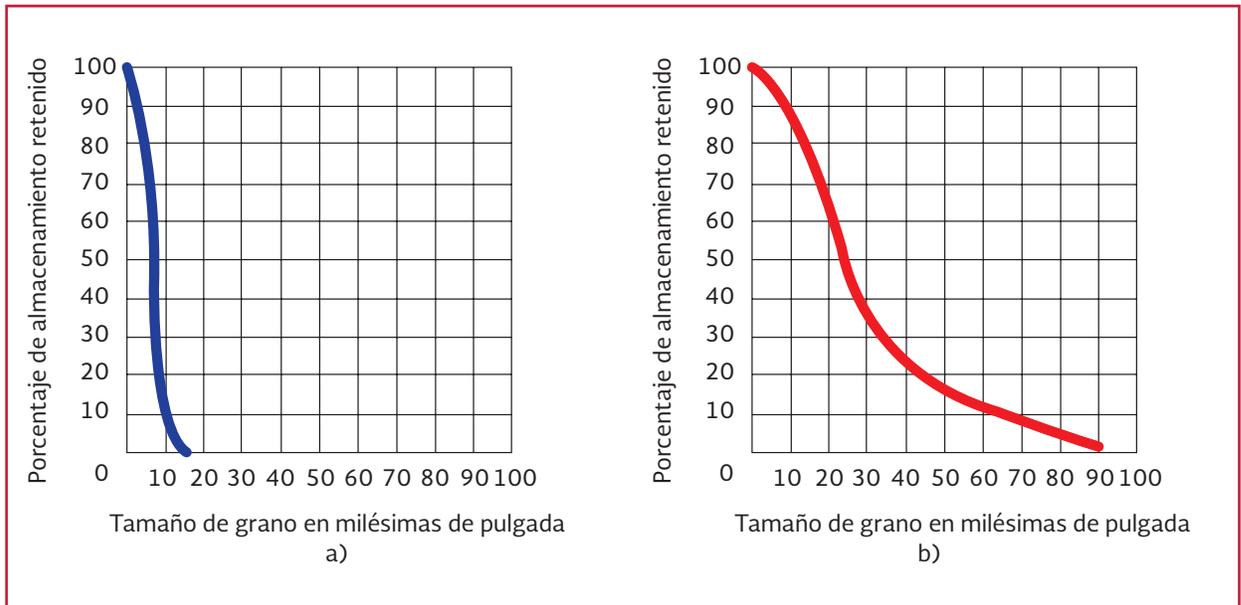
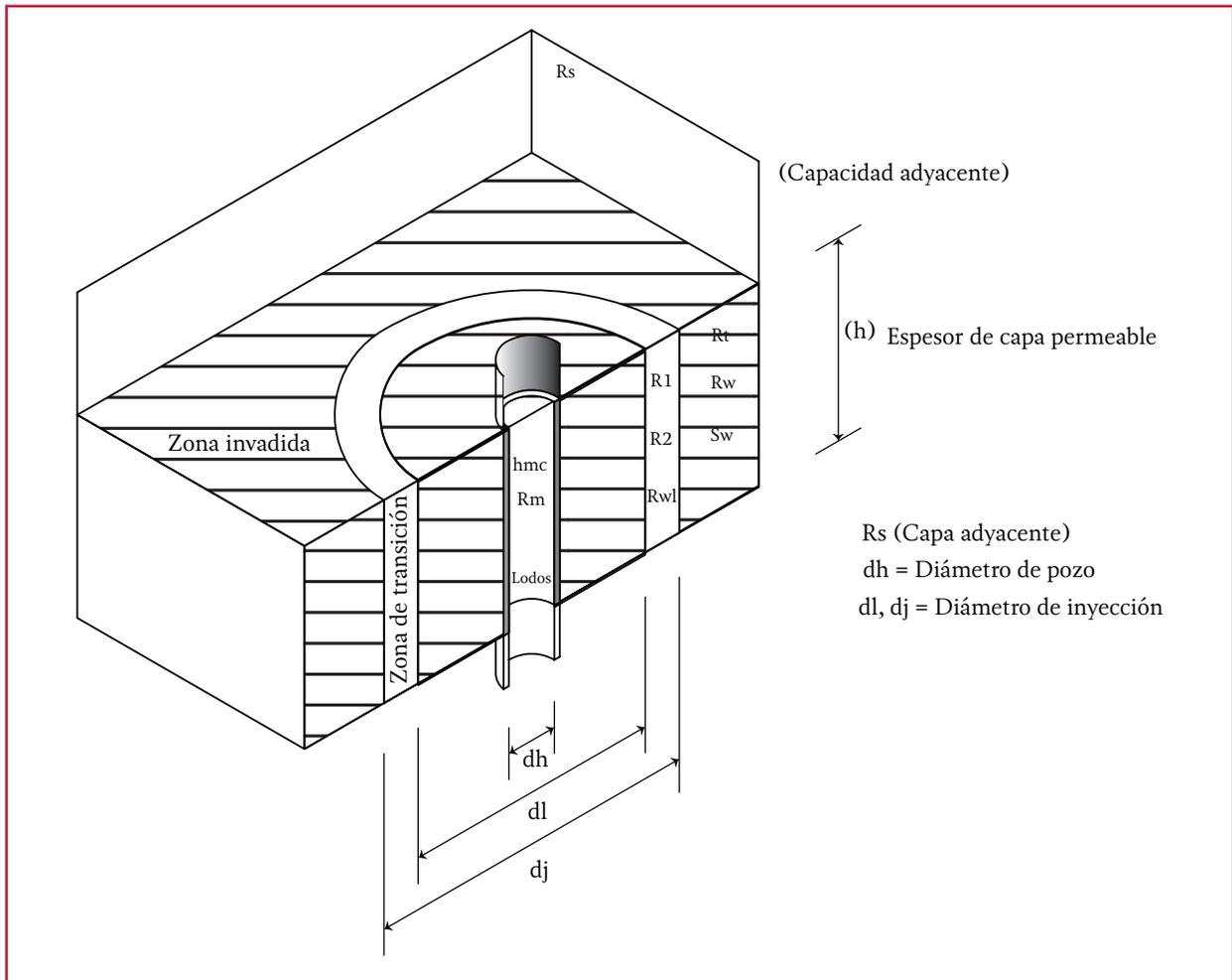


Ilustración 5.5 Condiciones en el pozo



$$n = \frac{V_h}{V_t} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

La porosidad se considera como total cuando se involucra todo el espacio poroso y efectiva cuando exclusivamente se determina el espacio poroso interconectado. Esta última es, consecuentemente, favorable en la transmisión de fluido.

También es común el uso de los términos porosidad primaria o espacio poroso intergranular original y porosidad secundaria, que es consecuencia de la acción de agentes geológicos tales como la lixiviación, el fracturamiento y el plegamiento. Para ser utilizada en algunos cálculos, la porosidad se expresa en términos de porcentaje o fracción decimal.

5.5.1.2. Permeabilidad

Es la capacidad de flujo de los fluidos contenidos en un material (roca). Se relaciona con algunos tipos de curvas de registros y con parámetros derivados de los registros. El valor de la permeabilidad puede estimarse con aceptable aproximación en medios granulares relativamente uniformes y solamente después de que las relaciones empíricas hayan quedado claramente entendidas.

5.5.1.3. Saturación de fluido

Es la relación entre el volumen del fluido en los poros y el volumen total de poros. La saturación se expresa como porcentaje del volumen de los poros. Para efecto de su uso en la hidrología de aguas subterráneas, se considera por norma general una saturación de acuífero del cien por ciento.

5.5.1.4. Resistividad

Es la capacidad de los materiales de oponerse al flujo de una corriente eléctrica y cuya unidad de medida es el ohm m²/m (generalmente expresado como ohm m).

5.5.1.5. Factor de resistividad de la formación

Conocido también como factor de formación (F), es la relación de la resistividad eléctrica de la roca 100 por ciento saturada de agua (R_o), con la resistividad del agua que la satura (R_w).

$$F = \frac{R_o}{R_w} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

donde:

F = Factor de formación

R_o = Resistividad de la roca saturada

R_w = Resistividad del agua saturante

5.5.2. REGISTROS GEOFÍSICOS DE APLICACIÓN EN LA HIDROGEOLOGÍA

5.5.2.1. Potencial espontáneo

La curva o registro de potencial espontáneo (SP) es una medida de las corrientes eléctricas (potenciales espontáneos naturales) que se producen dentro del pozo debidas al contacto entre fluidos de diferente concentración salina, como el fluido de perforación (lodo), el filtrado de lodo y el agua de la formación. Por lo tanto, solo puede obtenerse en pozos libres (sin ademe) y llenos de un fluido conductor.

Teóricamente, la máxima deflexión del SP en una capa permeable se denomina potencial espontáneo estático o SSP (Ilustración 5.6) y representa el valor que debe ser observado en un caso ideal, con la capa permeable aislada eléctricamente. Es el desarrollo máximo posible de SP en un manto acuífero libre de arcilla (Rider M. H., 1986). Solamente el SSP derivado del registro puede ser usado para la evaluación cuantitativa de R_w (resistividad del agua de formación).

$$SS = \log \frac{R_{mf}}{R_w} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

donde:

SS = Deflexión máxima del SP (SP estático) en milivolts

K = Constante de temperatura $64 + 0.23 T$

T = Temperatura del pozo en ° C

R_{mf} = Resistividad del filtrado del lodo en ohm-m

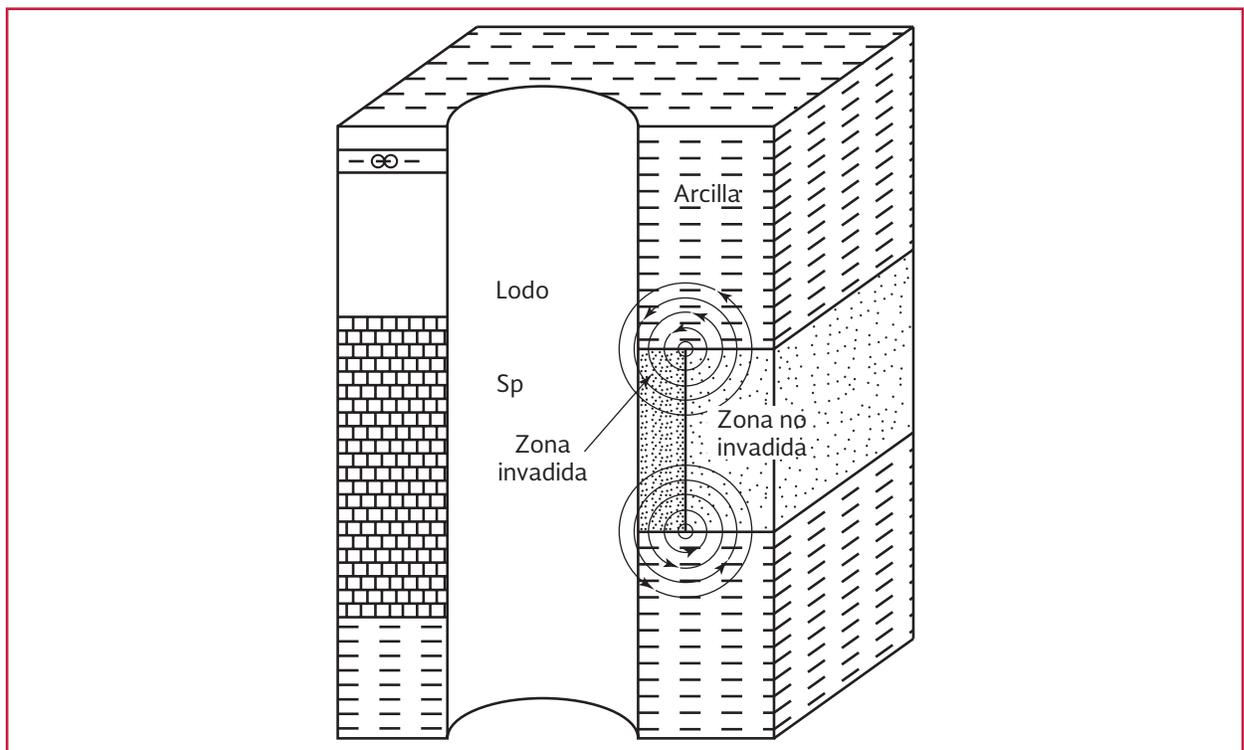
R_w = Resistividad del agua de formación en ohm-m

Despejando R_w , se determina su valor, que relacionado con la temperatura del intervalo, permite estimar la calidad del agua de formación por su salinidad en ppm, equivalentes en NaCl (cloruro de sodio). Sin embargo, debe recordarse que la ecuación anterior es confiable solo bajo ciertas condiciones:

- El agua de la formación debe ser relativamente salada
- El NaCl tiene que ser la sal predominante
- El lodo debe ser dulce y sin aditivos extraños (Keys y Mc Cary, 1971)

Es importante considerar que las deflexiones del SP no siempre corresponden a materiales porosos y permeables. En caso contrario, cuando no hay desarrollo de SP, no siempre se tratará de un material

Ilustración 5.6 Representación del potencial espontáneo estático



arcilloso o compacto, por lo que es recomendable tomar en cuenta los siguientes factores:

- Conocimiento geológico del área
- Calidad y tipo del agua
- Tiempo transcurrido entre la terminación del pozo y la obtención del registro
- Obtener la temperatura y resistividad del lodo o agua que se empleó durante la perforación
- Auxiliarse de otros registros

La aplicación principal que se da a esta curva es la de identificar las capas porosas y permeables. Pero existen otros factores que influyen para que un análisis basado únicamente en el *SP* conduzca a resultados erróneos, sobre todo si se trabaja con formaciones de naturaleza diferente a la arcillo-arenosa.

5.5.2.2. Registros de resistividad

El registro de resistividad mide la resistencia eléctrica de un volumen de material bajo la aplicación

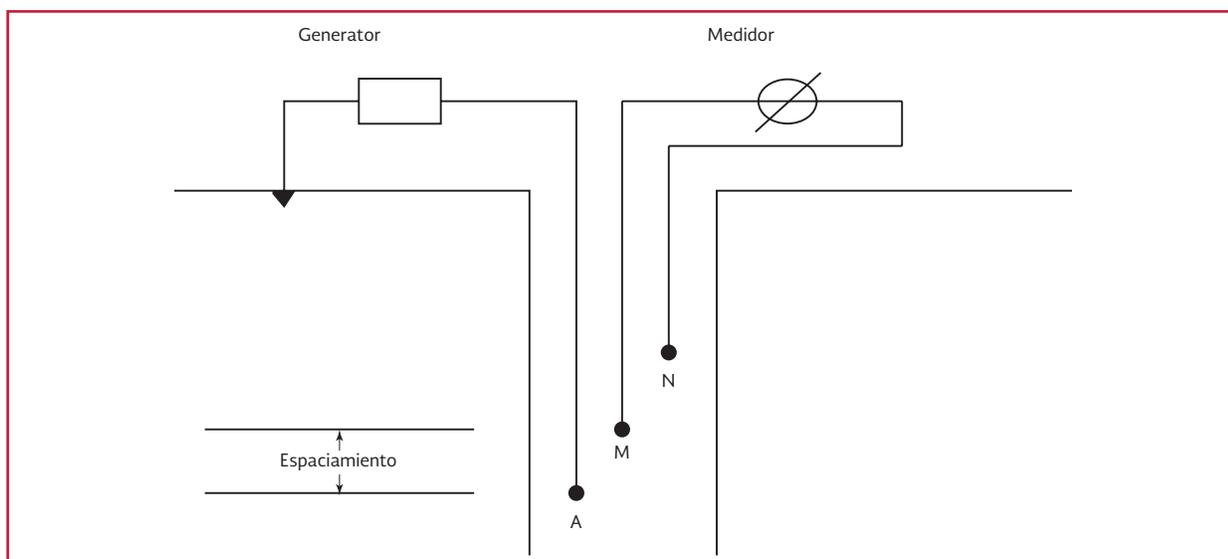
directa o inducida de una corriente eléctrica. De acuerdo con el dispositivo empleado, los registros son usados para determinar la resistividad de la formación, la resistividad del enjarre de lodo, la resistividad de la zona invadida, la saturación de agua, la resistividad de fluido, el factor de formación y la porosidad de la formación.

Los dispositivos o arreglos de electrodos limitan el radio de investigación en cada registro como sigue:

Normal corta. Espaciamento interelectrónico 0.40 m, con radio de investigación somero, de aproximadamente 0.80 m. Su mayor utilidad es medir la resistividad en la vecindad del pozo y la correlación y delimitación de estratos (Ilustración 5.6).

Normal larga. Espaciamento interelectrónico 1.60 m, con radio de investigación profundo, de aproximadamente 3.20 m. Se emplea en la determinación de la resistividad de la zona intermedia (R_i), la resistividad de la zona limpia (R_o) y la profundidad de invasión del fluido de perforación.

Ilustración 5.7 Dispositivo real arreglo normal



Lateral. Espaciamiento interelectrónico variable, para el caso de aplicación hidrogeológica 1.80 m, con radio de investigación aproximadamente igual al espaciamento entre electrodos. De utilidad en la determinación de la resistividad real (R_t), en formaciones gruesas y homogéneas (Ilustración 5.8).

Inducción. Dispositivo de corriente enfocada que funciona a base de bobinas transmisoras y receptoras. Determina la conductividad (inverso de la resistividad) de la formación ($1/R_t$), proporcionando valores de resistividad somera, intermedia y profunda más exactos y en condiciones donde los registros normales y laterales presentan anomalías de funcionamiento (Ilustración 5.9).

De guarda. Dispositivo que utiliza electrodos de guarda arriba y abajo del electrodo de corriente (aproximadamente 0.75 m de longitud) a fin de enfocar la corriente de la formación en un disco delgado que fluye perpendicularmente a la pared del pozo. Se aplica principalmente en lodos conductivos, formacio-

nes altamente resistivas y en estratos delgados. El radio de investigación es de aproximadamente tres veces la longitud del electrodo de guarda (Ilustración 5.10).

5.5.2.3. Rayos gamma naturales

Este registro mide la radiación natural de las formaciones, la cual es proporcional al contenido de arcilla debido a que los materiales altamente radiactivos tienden a concentrarse en ellas (Ilustración 5.11). Las arcillas emiten un alto nivel de rayos gamma, a diferencia de las formaciones limpias o libres de arcilla, en las que la irradiación es muy baja, con excepción de los casos en los que exista contaminación por agua con sales de potasio disueltas o de ceniza volcánica.

Se debe tener en cuenta que la medición se ve afectada por el tiempo que se invierte en el registro, por las variaciones estadísticas y por las condiciones en el pozo (diámetro de agujero, peso del fluido de perforación y si hay o no

Ilustración 5.8 Dispositivo real arreglo lateral

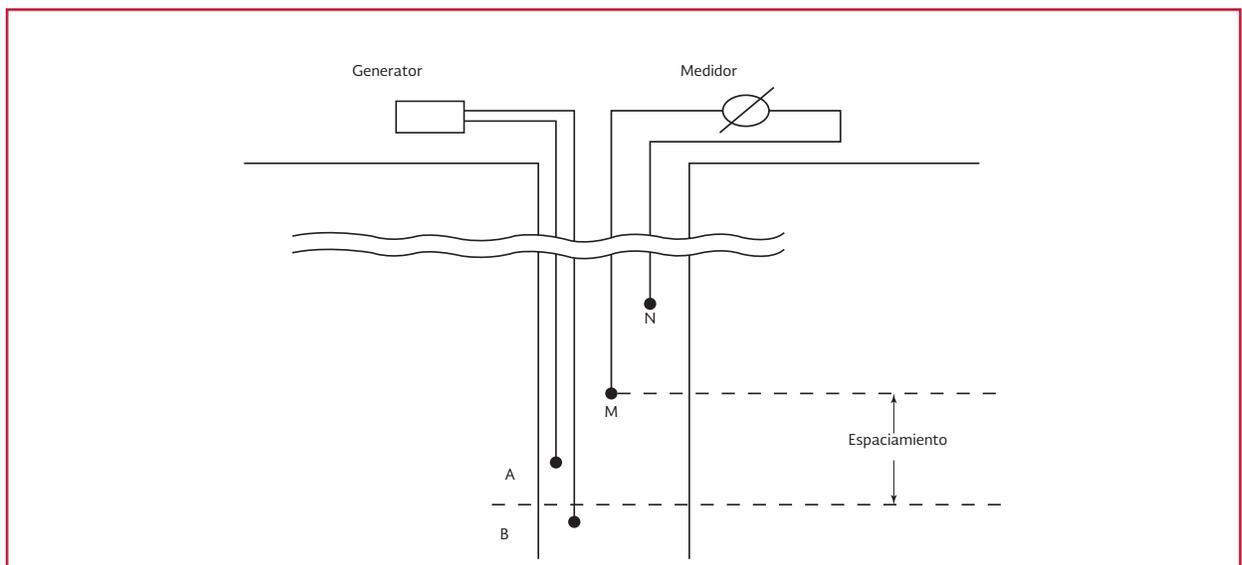


Ilustración 5.9 Arreglo de la sonda de inducción

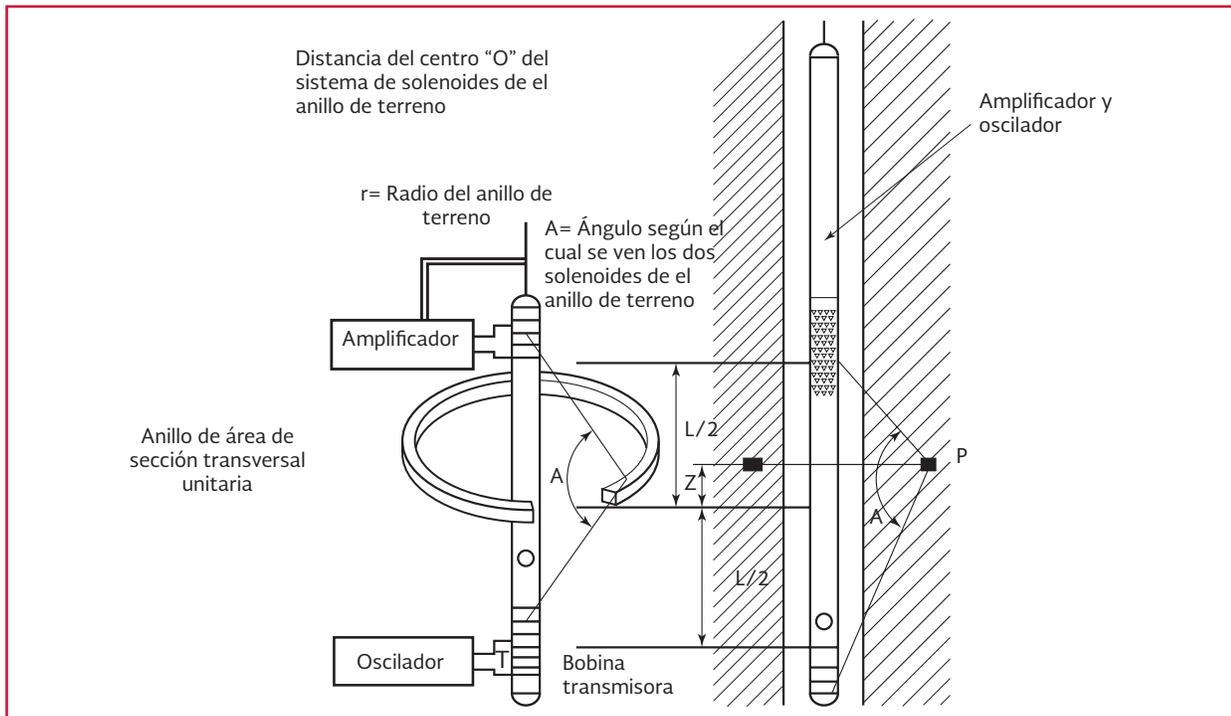


Ilustración 5.10 Sistema de registro de guarda

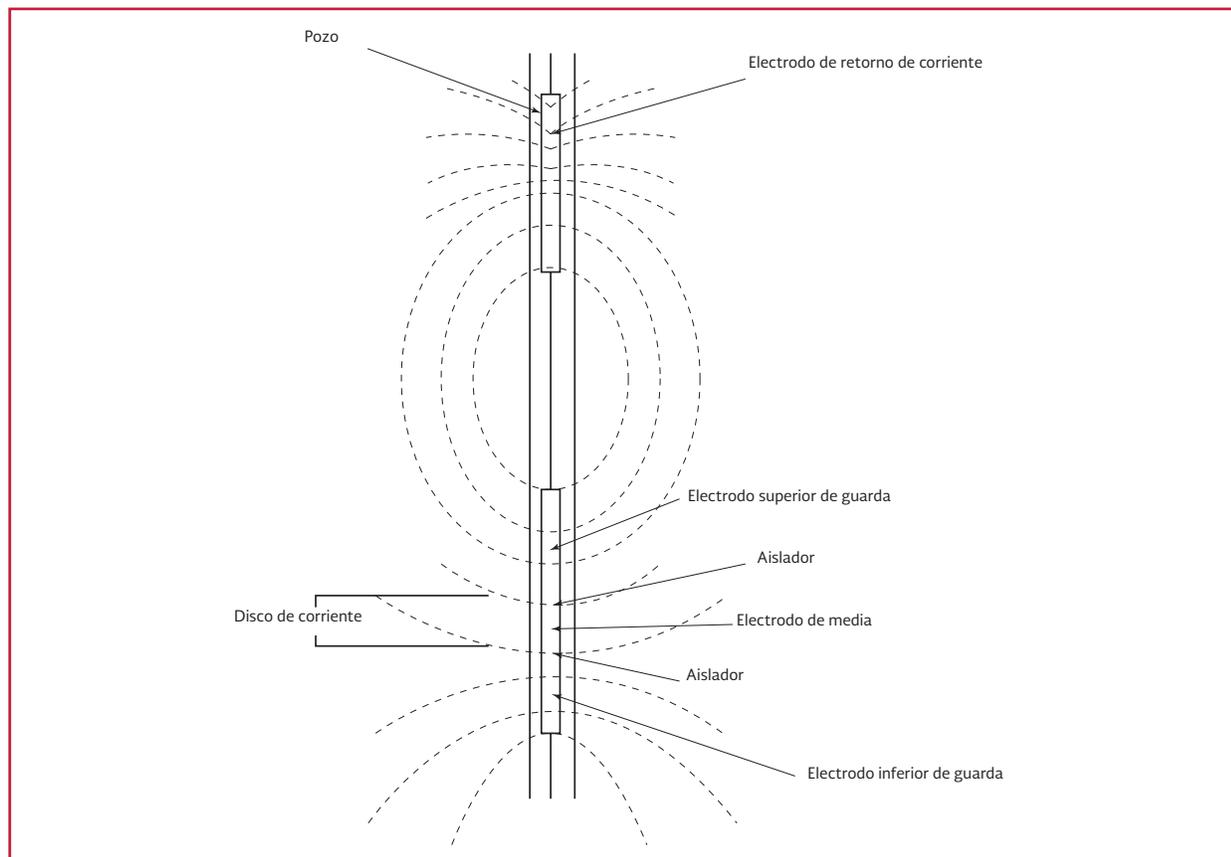
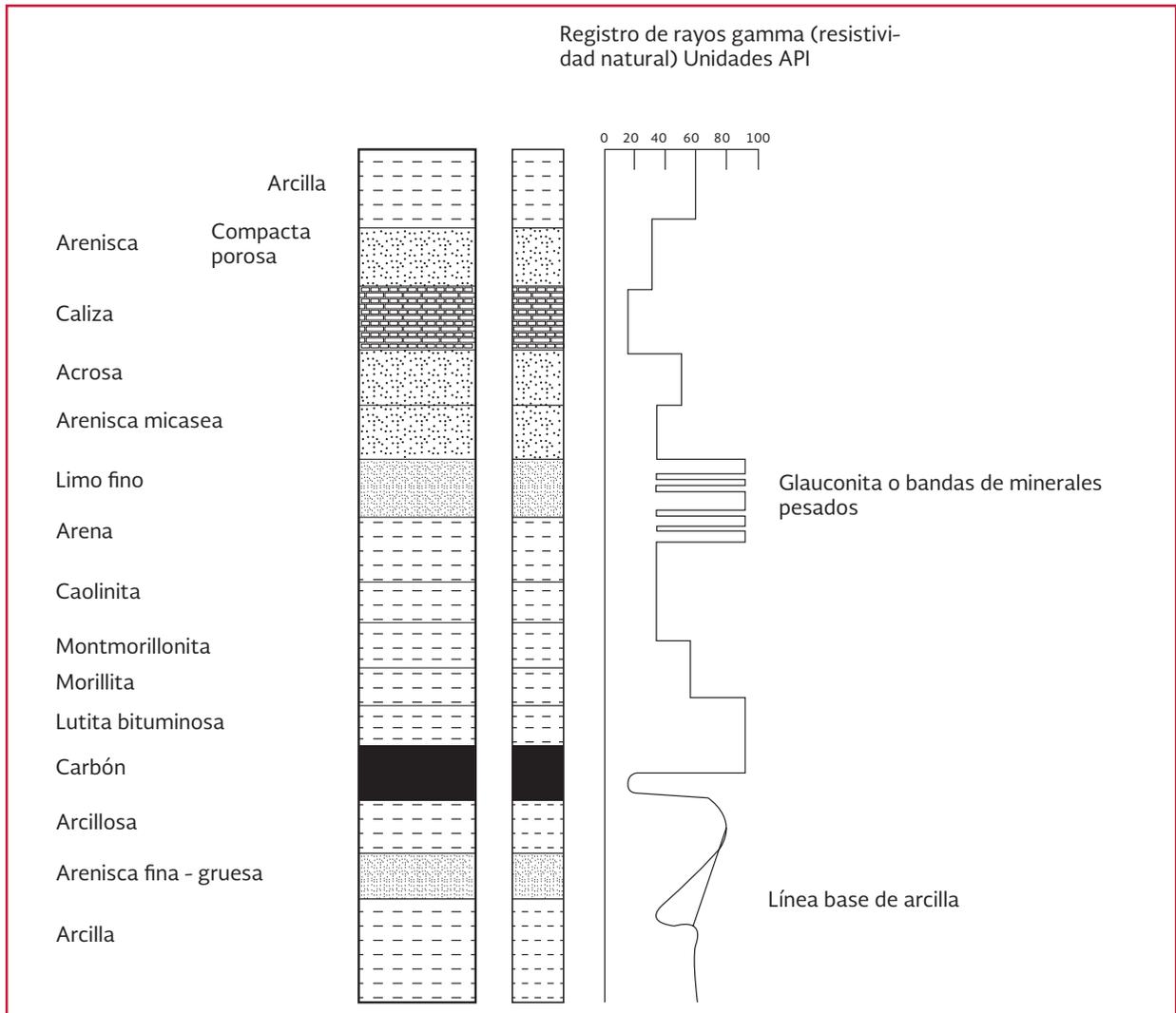


Ilustración 5.11 Respuestas típicas de rayos gamma naturales



ademe). Para la determinación del contenido de arcilla en un intervalo de la columna cortada por el pozo, se utiliza la siguiente expresión:

$$(V_{arc})RG = \frac{RG - RG_{min}}{RG_{max} - RG_{min}} \quad \text{Ecuación 5.4}$$

donde:

- $(V_{arc})RG$ = Volumen de arcilla en la roca del registro gamma
- RG = Valor de rayos gamma del intervalo

- RG_{min} = Valor mínimo de rayos gamma
- RG_{max} = Valor máximo de rayos gamma (en arcilla)

Es importante considerar que la cantidad de rayos gamma detectados incluye la radiactividad de otras fuentes ajenas a las arcillas, por lo que el resultado de la expresión anterior puede presentar una sobreestimación del V_{arc} (volumen de arcilla en la roca).

La unidad de medida es en CPS (cuentas por segundo) o en unidades API de radiación gamma.

5.5.2.4. Densidad (gamma-gamma)

El registro gamma-gamma mide la densidad de la roca. En principio, se emiten rayos gamma de mediana energía hacia la formación, mediante una fuente radiactiva montada en la sonda, los que después de interactuar con los electrones de la formación, son detectados por el contador como una medida de la densidad electrónica de la formación, que es proporcional a la densidad volumétrica de la misma (Ilustración 5.12).

Los materiales radiactivos usados para este tipo de emisiones son Cesio 137 o Cobalto 60. Las unidades de medida del registro se proporcionan en cuentas por segundo (CPS), en unida-

des API y en gr/cm^3 . En el último de los casos se requiere de un equipo calibrado de doble detector (registro de densidad compensada, Ilustración 5.13).

Se aplica principalmente para determinar la densidad de la formación, la porosidad total, la evaluación de arenas arcillosas, los cambios litológicos fuertes, los cambios significativos en la densidad del fluido y en la identificación de problemas detrás del ademe en pozos terminados.

El cálculo de la porosidad derivada del registro de densidad en un sistema roca fluido está dada por:

$$P_b = \frac{\text{Peso total del sistema roca fluido}}{\text{Volumen total del sistema roca fluido}}$$

Ecuación 5.5

Ilustración 5.12 Principio de sonda gama-gama

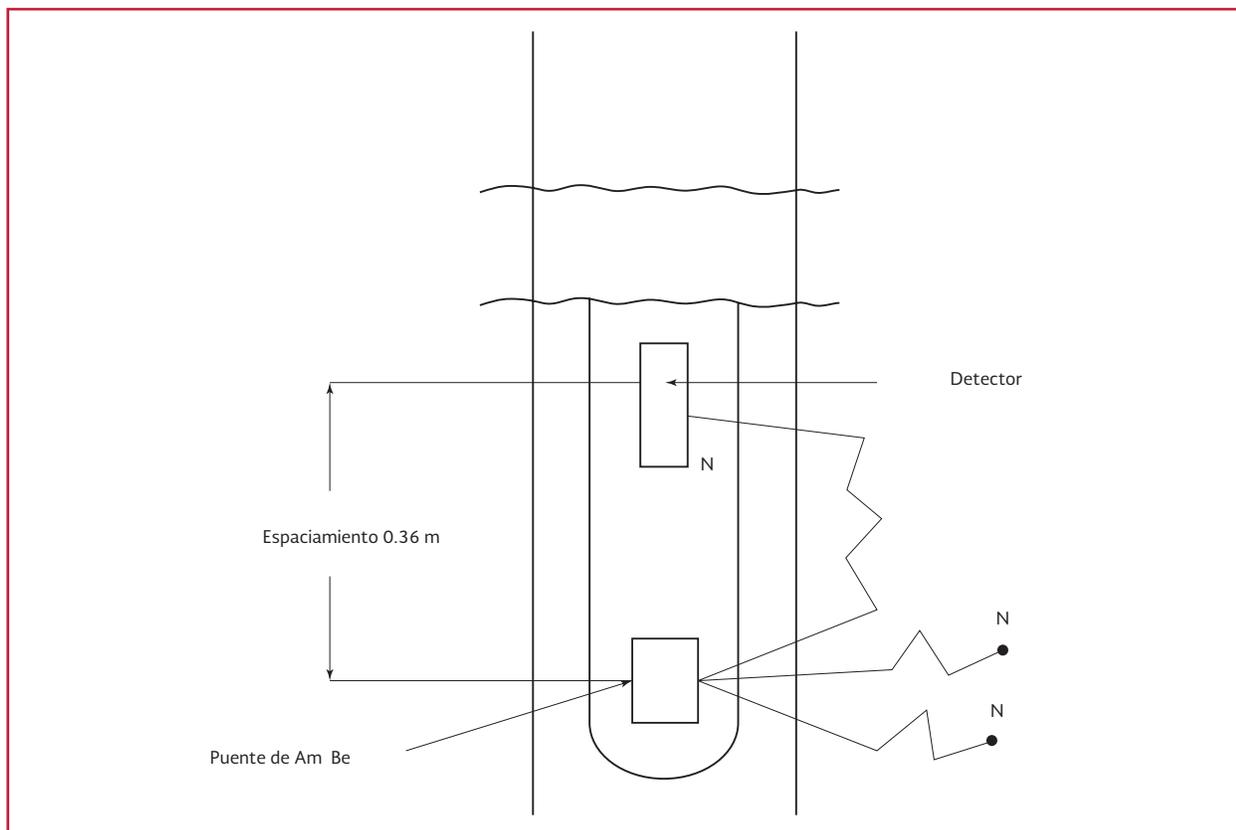
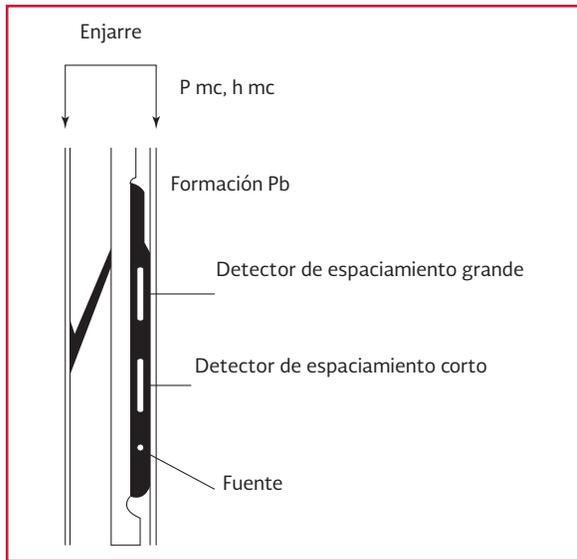


Ilustración 5.13 Sistema de densidad compensada



es decir:

$$P_b = \frac{(VT_{ma})(P_{ma})(VT_f)(P_f)}{1}$$

Ecuación 5.6

donde:

P_b = Densidad total obtenida del registro

VT_{ma} = Volumen total de la matriz

VT_f = Volumen total del fluido

P_{ma} = Densidad de la matriz

P_f = Densidad del fluido

que es igual a:

$$P_b = P_{ma}(1 - n) + nP_f \quad \text{Ecuación 5.7}$$

donde:

n = Porosidad

despejando n :

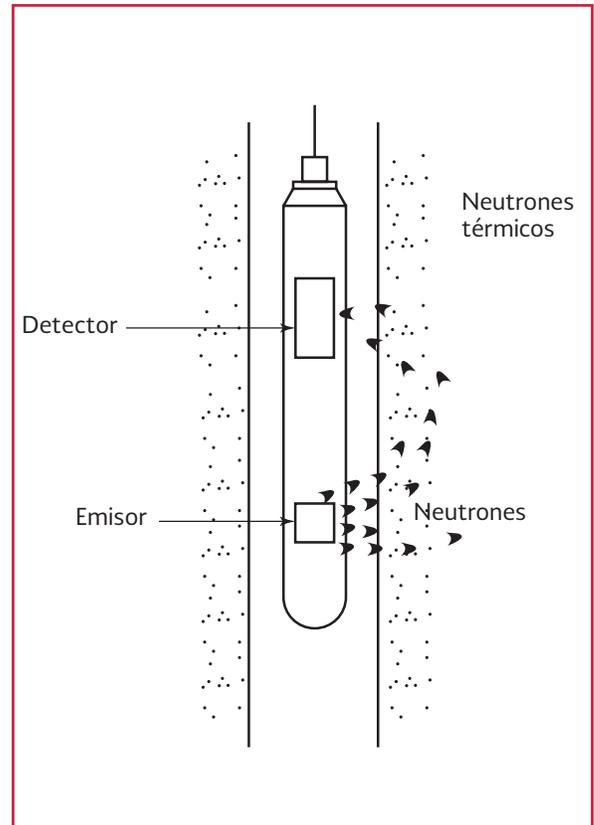
$$n = \frac{P_{ma} - P_b}{P_{ma} - P_f} \quad \text{Ecuación 5.8}$$

Para el caso del registro de densidad compensada, la porosidad se obtiene directamente del perfil.

5.5.2.5.5.2.5 Neutrón térmico

El registro es una medición de la radiación inducida en la formación mediante una fuente radiactiva química ($Am\ 241$) de emisión de neutrones rápidos (Ilustración 5.14).

Ilustración 5.14 Sistema Neutrón Térmico



Los neutrones son partículas de alta energía cuya masa se aproxima a la del núcleo de hidrógeno. Cuando los neutrones colisionan con los núcleos de la formación, van perdiendo parte de su energía y continúan su movimiento hasta alcanzar su nivel térmico de energía. Una parte de esta energía es capturada por los átomos de la formación, principalmente por aquellos que contienen átomos de hidrógeno y de cloro en sus poros. Cuando los neutrones colisionan con estos átomos, los neutrones pierden casi toda su energía, convirtiéndose en neutrones térmicos.

Por lo tanto, dependiendo del volumen de estos elementos en la formación, se tendrá una mayor o menor cantidad de neutrones térmicos detectados que es proporcional al volumen de poros en la roca. La unidad de medida se da en cuentas por segundos (CPS) y en unidades API (American Petroleum Institute) de neutrón.

Su principal aplicación en geohidrología es la determinación de intervalos con un alto índice de hidrógeno (presencia de agua), saturación, porosidad, espesor, litología y humedad. La porosidad derivada del registro neutrón se obtiene directamente con sondas calibradas.

5.5.2.6. Temperatura

El registro de temperatura es la medición continua de la temperatura del fluido en el pozo, es decir en gradiente geotérmico. Esta medición se

lleva a cabo mediante un sensor (termómetro) colocado en la parte inferior de la sonda, formado por un metal sensible a la temperatura y que varía su resistencia eléctrica de acuerdo con los cambios de aquella.

Se usa para determinar básicamente el gradiente geotérmico en el pozo, siempre y cuando se encuentren en equilibrio térmico las formaciones y el lodo de perforación, razón por la cual este registro se corre de arriba hacia abajo, evitando crear disturbios en el equilibrio alcanzado durante el reposo del fluido en el pozo (Ilustración 5.15).

El registro de temperatura se utiliza para delimitar las probables zonas de aporte de agua, para efectuar cálculos donde se involucre el valor de la temperatura y para detectar la cima del cemento detrás del ademe (Keys W. S., 1963).

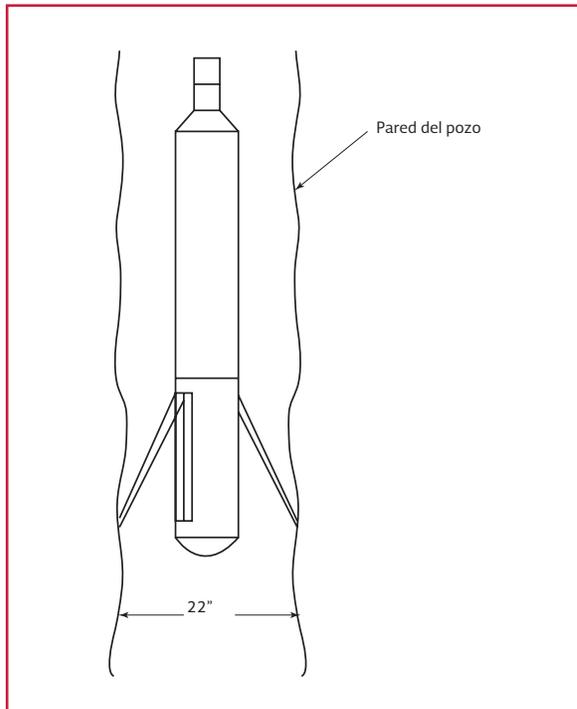
Ilustración 5.15 Sonda de temperatura



5.5.2.7. Calibración o Caliper

El registro Caliper es un registro mecánico que tiene la función de medir el diámetro promedio del pozo, usando desde 1 hasta 4 brazos resorte colocados concéntricamente en la parte inferior de la sonda (Ilustración 5.16).

Ilustración 5.16 Sonda de calibración



Las unidades de medida para este registro son diametralmente en pulgadas o en centímetros y el intervalo de operación es por lo general hasta 56 centímetros (22").

Con el uso de esta herramienta es posible determinar en forma cualitativa la estratificación, distribución y consolidación de las zonas arcillosas, de las fracturas abiertas y la ubicación de zonas porosas y permeables.

Obteniéndose el perfil en pozos adomados, se determinan las uniones de los tramos de tubería, se sabe si es tubo ciego o ranurado, se define

la ubicación y el tipo de las reducciones existentes y si el pozo ha sufrido algún colapso o ruptura, determinando sus dimensiones.

Es imprescindible su uso para el análisis e interpretación de otros registros y en cálculos de correcciones donde se involucre el diámetro del pozo.

5.6. PLANEACIÓN DE UN LEVANTAMIENTO GEOELÉCTRICO

5.6.1. GENERALIDADES

En la prospección geoelectrica existen diferencias entre la teoría y la práctica que señalan el carácter interpretativo de los métodos utilizados en este tipo de exploración. Cuando se estudia una zona es posible emplear los métodos geoelectricos como parte del proceso exploratorio. Debe considerarse el perfil teórico de cada método de exploración para decidir cuál de ellos es el que mejor se adapta al sitio en estudio. También deben considerarse los aspectos administrativos y de logística. Orellana (1982) plantea seis pasos a seguir en todo levantamiento en una campaña de exploración para conseguir un máximo de calidad en los datos obtenidos, ocupando un mínimo de tiempo y con mínima inversión :

1. Planteamiento del problema y recopilación de datos preexistentes de la zona de trabajo (geología, geohidrología, etc.)
2. Elección del método y su modalidad, en función de los objetivos y circunstancias
3. Programación detallada del trabajo de campo
4. Ejecución de los trabajos de campo

5. Recopilación y procesamiento de los datos obtenidos (trabajo de campo)
6. Interpretación física de los resultados anteriores (modelación) y su integración geológica y geohidrológica, seguida de las conclusiones y recomendaciones pertinentes

Es importante hacer notar que cada una de las etapas enunciadas se apoya en la que le precede, determinando la etapa de menor calificación la calidad total del trabajo. Por ejemplo, si los datos de campo son de mala calidad, el resto del trabajo lo será aunque su procesamiento e interpretación sean excelentes. Pese a que los resultados parezcan buenos, no corresponderán adecuadamente con la realidad del sitio estudiado.

En este capítulo se mencionarán estos seis puntos, de la misma forma en que lo hace Orellana, pero de manera tal que sean aplicables para todos los métodos geoelectricos de exploración del agua subterránea.

5.6.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y RECOPIACIÓN DE DATOS PREVIOS

En una campaña de prospección para agua subterránea rara vez se emplean los métodos geoelectricos como único recurso exploratorio pues casi siempre van asociados con los métodos geológicos y los geohidrológicos. Cada método tiene sus propios objetivos y en conjunto producirán resultados finales completos. Con base en esto, es necesario definir los objetivos buscados al emplear los métodos geoelectricos en la campaña exploratoria.

Este punto es importante y hay que establecerlo bien antes de iniciar el trabajo de campo para no albergar falsas expectativas ni propiciar conclusiones erróneas al final del proyecto, que es cuando se toman costosas decisiones de perforación y de producción. Sería inútil, por ejemplo, esperar que un levantamiento geoelectrico nos indique qué gasto de agua se extraerá de los acuíferos del subsuelo, pues ese dato se obtiene después de todo un estudio geohidrológico, incluyendo las perforaciones exploratorias y las pruebas hidráulicas preliminares.

Los métodos geoelectricos están diseñados para medir contrastes de resistividad eléctrica en el subsuelo y relacionar estas mediciones, mediante el uso de modelos teóricos con una estratigrafía que no necesariamente debe corresponder a la estratigrafía litológica, sino que estará definida con base en la resistividad eléctrica que caracterice a una cierta porción de los materiales que constituyen el subsuelo. Por lo tanto, los objetivos del estudio geoelectrico deberán establecerse en estos términos para conjuntarlos con los datos que se obtengan de un estudio geológico y de otro geohidrológico.

Para estos estudios deberá considerarse:

1. Establecer *a priori* el que exista contraste de resistividad entre el objetivo buscado (acuifero) y el medio circundante (por ejemplo, lentes de arena y grava intercalados en una formación arcillosa)
2. El relieve topográfico
3. La vegetación y el clima de la zona
4. La ubicación y accesos
5. Posibilidades de hospedaje, alimentación, e infraestructura en la zona

De lo anterior se deduce que es necesario contar con toda la información disponible de la zona en estudio:

- Cartografía topográfica
- Fotografía aérea
- Mapas y cortes geológicos
- Información del subsuelo obtenida de perforaciones
- Informes geológicos
- Datos de campañas geofísicas anteriores
- Información geográfica
- Información geohidrológica (niveles freáticos, acuíferos, precipitación, datos de recarga y de pozos productores cercanos, etc.)

Con base en la información obtenida se podrán definir los objetivos particulares de cada método de exploración (geoeléctrico, geográfico, geohidrológico) y los objetivos finales de la campaña exploratoria.

5.6.3. ELECCIÓN DEL MÉTODO GEOELÉCTRICO MÁS ADECUADO

En este inciso se parte de la suposición de que los objetivos a lograr con la prospección geoelectrica ya fueron definidos de acuerdo con los lineamientos del inciso anterior. En este punto se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos del objetivo:

- Profundidad de la investigación
- Topografía y vegetación del sitio
- Características del acuífero en evaluación
- Salinidad esperada
- Extensión del área por explorar
- Detalle deseado, tanto en sentido verti-

cal como horizontal

- Tiempo del proyecto
- Presupuesto del proyecto

De acuerdo con lo anterior, podrán seleccionarse los métodos que mejor se adapten a las características y al presupuesto del proyecto en campo. También es importante considerar la preparación y la experiencia del personal y los equipos disponibles.

Tomemos como ejemplo el caso de un proyecto pequeño para el suministro de agua a un rancho. Se cuenta con información de los pozos existentes en el acuífero regional y lo único que se necesita es reconocer esa misma información en los límites del predio y proyectar un pozo exploratorio, sabiendo que la profundidad de investigación de interés es de 200 metros y que el terreno es sensiblemente plano. En este caso, lo más recomendable es la realización de tres sondeos eléctricos verticales con arreglo Schlumberger y AB/2 máximo de mil metros, pues en el mercado hay muchas compañías que cuentan con el equipo necesario.

La práctica del método está muy difundida y existen varias opciones de computación para el procesamiento de los datos. No obstante, el problema también podría abordarse mediante sondeos por transitorio electromagnético, tendiendo un *loop* de 300 x 300 metros si hay disponibilidad de equipo y personal capacitado para la interpretación.

En el caso de un proyecto en el que se prevé el acuífero a profundidades mayores de 700 metros, la práctica del sondeo eléctrico vertical se vuelve más complicada en el campo, ya que la cantidad de cable, de personal y de potencia que se necesita en el equipo encarecen mucho el método y alargan su tiempo de ejecución, por

lo que sería más recomendable la realización de sondeos por transitorio electromagnético. Si la profundidad es del orden de los mil metros o mayor, será más costoso utilizar sondeos magnetotelúricos.

Cuando las zonas de estudio son grandes y se requiere evaluar acuíferos someros de gran extensión, como en el caso de las zonas desérticas o de acuíferos con agua salobre para obtención de agua potable por tratamiento, quizá lo más recomendable serían los métodos electromagnéticos aerotransportados para cubrir un área grande en un tiempo mínimo, lo cual redundará en costos de operación y tiempos mucho menores a los de los métodos terrestres.

De los casos más difíciles de resolver son los acuíferos en rocas con porosidad secundaria. En este caso es recomendable aplicar un método con el que se pueda hacer la interpretación con modelos bidimensionales y encaminar el objetivo del estudio a reconocer las zonas que presenten características de permeabilidad y saturación.

Con el solo conocimiento de las características del área de estudio y de los objetivos que se persiguen, es posible seleccionar alguno de los métodos geoelectricos existentes y diseñar un programa de trabajo. Esta selección de método y equipo dependerá también de los costos comparativos para la aplicación de cada uno de ellos.

5.6.4. PROGRAMACIÓN DETALLADA DEL TRABAJO DE CAMPO

Una vez seleccionado el método o métodos a utilizar, se continúa con la importante etapa de la programación de estos trabajos. En esta etapa

se define la logística, la organización y la densidad de las mediciones, todo ello, dependiendo del conocimiento previo que se tenga del área de estudio, de los objetivos y del método escogido.

En el caso de un proyecto grande, como podría ser el abastecimiento de agua a una zona urbana, se considera la etapa en la que se encuentra el proyecto y su alcance, es decir, si el estudio es de carácter regional para la evaluación de las zonas más prometedoras, o si es de detalle, para tomar decisiones de perforación de pozos. En cada uno de estos casos, la densidad de las mediciones es diferente, y ello tiene implicaciones varias, como las distancias para trasladar los equipos entre los puntos de medición, los permisos de acceso a los sitios de las mediciones (sobre todo cuando estos se encuentran dentro de una propiedad privada) y las diferencias en la topografía y en la litología cuando se trata de áreas muy grandes, etc.

También hay que decidir quién ejecutará el trabajo, si el personal de la misma empresa o bien un contratista que cuente con el equipo y la experiencia necesaria.

5.7. MÉTODOS GEOELÉCTRICOS EN OBRAS HIDRÁULICAS

5.7.1. MÉTODOS ELÉCTRICOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS

Para la actividad económica relacionada con el subsuelo, como la minería, la extracción del agua subterránea, del petróleo o la construcción, es de gran ayuda conocer la distribución de la resistividad de los materiales, pues los procesos

relacionados con la conducción de la corriente eléctrica están relacionados con características del subsuelo que generalmente son de importancia. También es el caso de la construcción de presas y de obras de conducción.

Al conocer la distribución de las resistividades, se puede contar con información de las siguientes características del subsuelo:

- Profundidad de los suelos hasta la roca firme
- Profundidad del nivel freático
- Estimación de la calidad de la roca
- Cuantificación preliminar de los bancos de material
- Modelación de las estructuras geológicas de un sitio como ayuda en el desarrollo del proyecto de la construcción de una obra grande
- Agresividad del suelo

Profundidad de la roca firme

En este caso, frecuentemente se da un contraste notorio entre la resistividad del suelo y la de la roca firme. Por esta razón, los métodos eléctricos, sobre todo los SEV, suelen ser rápidos y económicos para definir esta profundidad.

Profundidad del nivel freático

El problema a resolver es el mismo que para la prospección del agua subterránea, con la diferencia de que el objetivo se localiza en los primeros metros bajo la superficie del terreno.

Estimación de la calidad de la roca

Es posible la elaboración de tablas que definan la calidad de una roca, si se conoce tanto la distribución de resistividades como la distribución de las velocidades de transmisión de las ondas elásticas en la roca.

El procedimiento a seguir para obtener una calidad de roca es el definido por Barton (1974) o Bieniawski (1974), Tabla 5.2. Estas definiciones se basan en la resistencia de las rocas, la porosidad secundaria y la presencia de fluidos y arcilla.

La Ilustración 5.17 es una de las gráficas que pueden ser utilizadas para estimar la calidad de las rocas en términos de la competencia geomecánica definida en la *sd*, y con base en la resistividad y la velocidad de transmisión de las ondas elásticas. En esta gráfica se ha considerado que la conductividad del suelo se debe totalmente a procesos electrolíticos o a la presencia de arcilla.

Tabla 5.2 Calidad de roca

| Barton | Geopisi | Bieniawski |
|-------------------------------------|---|---|
| Parámetros utilizados | | |
| 1. Designación de calidad de roca | 1. Resistencia a la compresión uniaxial del material rocoso | 1. Velocidad de transmisión de las ondas sísmicas en los materiales rocosos |
| 2. Conjunto de fracturas | 2. Designación de calidad de roca (rod) | 2. Resistividad eléctrica de los materiales rocosos |
| 3. Rugosidad de fracturas | 3. Espaciamiento de las fracturas | |
| 4. Alteración de fracturas | 4. Orientación de las fracturas | |
| 5. Factor de reducción de agua | 5. Condición de las fracturas | |
| 6. Factor de reducción de esfuerzos | 6. Flujo de agua subterráneo | |

Tabla 5.3 Calidad de roca (continuación)

| Parámetro de influencia en la velocidad de transmisión de las ondas sísmicas en los materiales rocosos | | Parámetro de influencia en la resistividad eléctrica de los materiales rocosos | |
|--|----------------------------|--|---|
| 1 | Litología | 1 | Litología |
| 2 | Compacidad de la roca | 2 | Porosidad y fracturamiento |
| 3 | Fracturamiento y porosidad | 3 | Contenido de fluidos y su salinidad |
| 4 | Alteraciones | 4 | Arcillosidad |
| 5 | Homogeneidad | 5 | Mineralización con conducción electrónica |
| 6 | Grado de saturación | 6 | Alteraciones |

La gráfica continúa hacia la derecha marcando las zonas 5, 4, etc., acrecentando gradualmente la calidad de la roca, la que debe mostrar mayor resistividad y mayor velocidad de transmisión de las ondas sísmicas. Los macizos rocosos de la zona 4 se consideran de mala calidad y los de la zona 3 de regular, los de la zona 2 de buena y los de la zona 1 de excelente calidad, atribuyéndosele las características ilustradas en la Tabla 5.4 (Pérez Angon, 1986). Esta clasificación de las rocas no es universal ya que ha sido hecha con base en la experiencia de algunos ingenieros dedicados a la geofísica aplicada o a la ingeniería civil durante muchos años y aunque se incluyeron diferentes tipos de litologías encontradas

en diferentes proyectos para la construcción de grandes presas, esta clasificación no deja de ser empírica, por lo que es necesario hacer ajustes para cada zona de estudio.

Esta tabla (Tabla 5.4) se divide en cinco zonas, comenzando con la zona 5, en donde las rocas presentan baja resistividad, alta relación de Poisson (σ) y baja velocidad de transmisión de las ondas sísmicas. A los macizos rocosos clasificados en esta zona se les considera de calidad muy mala y se les atribuye fuerte intemperización, ser rocas de suaves a muy suaves, poseer fuerte fracturamiento, contar con módulos elásticos muy cercanos a los que tienen los suelos, etcétera

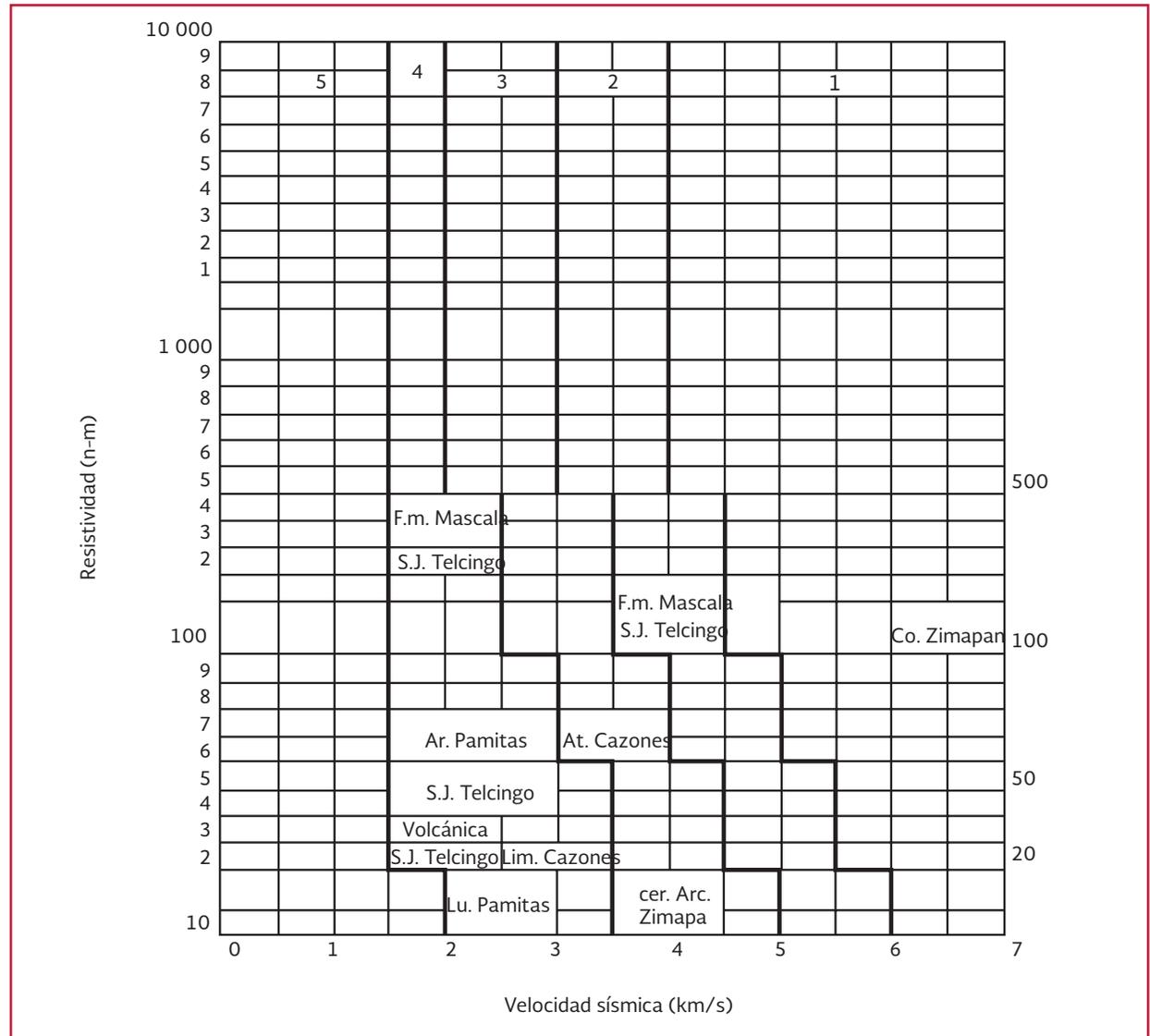
Tabla 5.4 Descripción de clasificación de rocas por interpretación geofísica

| Categoría o tipo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|---|---|---|--|--|
| Calidad de roca | Excelente | Buena | Regular | Mala | Muy mala |
| Condición de intemperismo | Fresca a muy fresca | Predominantemente fresca | Ligeramente intemperizada | Intemperizada en su mayor parte | Fuertemente intemperizada |
| Condición de rigidez | Compacta a muy compacta | Generalmente compacta a compacta | Medianamente compacta | Medianamente compacta a moderadamente suave | Suave a muy suave |
| Frecuencia y condición de fracturamiento | Poco distribuido y cerrado | Más o menos distribuido y cerrado en su mayor parte | Ampliamente distribuido y parcialmente abierto | Notablemente distribuido y abierto en su mayor parte | Profusamente distribuido y de difícil identificación |
| Propiedades mecánicas típicas | $0.16 \leq \sigma \leq 0.20$ | $0.18 \leq \sigma \leq 0.25$ | $0.25 \leq \sigma \leq 0.40$ | $0.30 \leq \sigma \leq 0.45$ | $0.35 \leq \sigma \leq 0.48$ |
| Características geotécnicas | Generalmente impermeable; macizos rocosos competentes | Poco permeable; aceptable para excavaciones y cimentaciones | Bajo nivel de competencia para obras subterráneas | Generalmente permeable o de alto contenido arcilloso | Taludes y capes; altera en arcillas y/o arenas |

Tabla 5.4 Descripción de clasificación de rocas por interpretación geofísica (continuación)

| Categoría o tipo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|---|---|---|--|--|
| Calidad de roca | Excelente | Buena | Regular | Mala | Muy mala |
| Condición de intemperismo | Fresca a muy fresca | Predominantemente fresca | Ligeramente intemperizada | Intemperizada en su mayor parte | Fuertemente intemperizada |
| Condición de rigidez | Compacta a muy compacta | Generalmente compacta a compacta | Medianamente compacta | Medianamente compacta a moderadamente suave | Suave a muy suave |
| Frecuencia y condición de fracturamiento | Poco distribuido y cerrado | Más o menos distribuido y cerrado en su mayor parte | Ampliamente distribuido y parcialmente abierto | Notablemente distribuido y abierto en su mayor parte | Profusamente distribuido y de difícil identificación |
| Propiedades mecánicas típicas | $0.16 \leq \sigma \leq 0.20$ | $0.18 \leq \sigma \leq 0.25$ | $0.25 \leq \sigma \leq 0.40$ | $0.30 \leq \sigma \leq 0.45$ | $0.35 \leq \sigma \leq 0.48$ |
| Características geotécnicas | Generalmente impermeable; macizos rocosos competentes | Poco permeable; aceptable para excavaciones y cimentaciones | Bajo nivel de competencia para obras subterráneas | Generalmente permeable o de alto contenido arcilloso | Taludes y encapes; altera en arcillas y/o arenas |

Ilustración 5.17 Clasificación de “calidad de roca” por interpretación geofísica



5.7.2. CUANTIFICACIÓN PRELIMINAR DE BANCOS DE MATERIAL

Se trata de determinar un espesor, por ejemplo, de un depósito de arcillas hasta la roca firme o hasta el contacto con la capa subyacente, que debe tener una resistividad diferente para que el método funcione. Lo mismo sucede cuando se quiere cuantificar un banco de gravas o de roca. La exploración geoelectrica en este caso debe ir acompañada de un número pequeño de perforaciones que sirvan para calibrar las interpretaciones que se hagan de los sondeos geoelectricos.

5.7.3. MODELACIÓN GEOMORFOLÓGICA Y ESTRUCTURAL DEL SITIO

En este caso la interpretación de los sondeos geoelectricos será correlacionada con la información geoestratigráfica existente, lo cual permitirá hacer interpolaciones que provean un mejor modelo que ayude en la interpretación de las estructuras presentes en el subsuelo.

5.7.4. AGRESIVIDAD DEL SUELO

Por la experiencia del personal dedicado al mantenimiento de tuberías de conducción y de almacenamiento en tanques metálicos enterrados, se sabe que la agresividad del terreno está directamente relacionada con su conductividad y por lo tanto, es necesario conocerla a la profundidad en que se encuentren las tuberías o los tanques.

Se han desarrollado muchas aplicaciones para la medición de la resistividad del subsuelo que no están relacionadas directamente con la geohidrología y quedan fuera de los objetivos de este libro.

5.8. EQUIPOS Y ACCESORIOS EN LA EXPLORACIÓN GEOELÉCTRICA

5.8.1. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA SELECCIÓN DE UN EQUIPO

Uno de los aspectos más importantes en la práctica de la exploración geoelectrica es la adecuada selección del equipo para el trabajo específico a realizar. En el caso de algunos métodos, la opción de la oferta de equipo en el mercado se reduce a dos o tres fabricantes, como en el caso del método magnetotelúrico. En otros, como en el método de sondeo eléctrico vertical, la oferta de equipos abarca desde los de fabricación doméstica de baja potencia hasta los altamente sofisticados de opción múltiple y con gran potencia.

Si se toma en cuenta lo mencionado en los capítulos anteriores, la selección del equipo a utilizar deberá ir acorde con los siguientes parámetros:

- Profundidad de investigación requerida en el proyecto
- Características de la zona a estudiar
- Cantidad de trabajo que se realizará
- Resolución requerida
- Condiciones geoelectricas esperadas
- Objetivos del estudio
- Oferta de mercado
- Portabilidad
- Ruido ambiental

Estos parámetros son de carácter universal para la elección del equipo adecuado en los métodos geoelectricos, independientemente de si la selección se hará entre diversos equipos para

aplicar un método ya especificado, o para elegir entre varios métodos y diferentes equipos.

En la práctica es importante tomar en cuenta estos parámetros considerando el presupuesto del proyecto y para lograr los objetivos buscados.

Por ejemplo, si la zona por explorar es pequeña, la profundidad de investigación requerida es somera y la resistividad superficial es la normal para suelos, el trabajo se puede efectuar con un equipo pequeño de poca potencia y alimentado con baterías.

Si la profundidad de investigación requerida o la conductividad superficial aumentan, estos equipos ya no podrán realizar el trabajo, por lo que se requerirá de otros más potentes, alimentados con motogenerador.

Si lo que se requiere en primera instancia es evaluar el método geoelectrico óptimo para un objetivo específico, los nueve puntos anteriores resultan también ser los parámetros de evaluación.

Si se trata de un proyecto geohidrológico en el que se requiere evaluar una zona muy grande pero con profundidad de investigación somera (no mayor a 200 metros), el aspecto económico y el tiempo requerido para el estudio deberán ser determinantes para la elección del método óptimo.

Por un lado están los métodos terrestres, que desde el punto de vista de los precios unitarios parecen ser más baratos, pero cuando su número se incrementa, el tiempo de su ejecución y los costos globales que acarrear pueden hacerlos

más caros que los métodos aéreos, más caros en principio, pero más económicos a la larga ya que su tiempo de ejecución es más corto y la obtención de resultados es más rápida.

5.8.2. OFERTA DE MERCADO

Una vez elegido el método a utilizar debe seleccionarse el equipo adecuado. Es aquí donde deben tomarse en cuenta las características de cada uno de ellos, tanto técnicas como económicas. Para los métodos de corriente continua hay una amplia oferta tanto nacional como extranjera.

5.8.3. ACCESORIOS

En una campaña de prospección geoelectrica, además de la selección del equipo idóneo para las mediciones debe tomarse en cuenta lo que se conoce como equipo accesorio. Este incluye el tipo de transporte requerido, el equipo de campamento y las herramientas necesarias para la preparación del terreno en el que se van a colocar los componentes del arreglo (cables, bobinas, electrodos, carretes, etcétera).

Estos accesorios resultan, a fin de cuentas, tan importantes como el mismo equipo, pues sin ellos no podría efectuarse el trabajo. La calidad de la información recopilada dependerá en gran medida de la calidad del equipo accesorio, debiendo ser cuidadosamente seleccionado por el prospector antes de iniciar una campaña exploratoria, sobre todo si se va a realizar en un área apartada de los asentamientos humanos.



6

DISEÑO DE POZOS

Se entiende por diseño de pozos a los procedimientos encaminados a determinar las dimensiones adecuadas de la estructura física y a la correcta elección de los materiales a emplear en la construcción y el terminado del pozo. Estos procedimientos están circunscritos a las características geohidrológicas de la ubicación del aprovechamiento, por lo que se recomienda conocer algunas propiedades hidráulicas del acuífero, como son:

- Información estratigráfica de las capas de sedimentos y rocas atravesados durante su perforación
- Valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento del acuífero
- Condiciones de balance hidrológico
- Análisis granulométrico de los materiales no consolidados, así como de la identificación de los minerales de las rocas

Los objetivos que se buscan obtener con un buen diseño de pozo son:

- Adecuado rendimiento y larga vida útil
- Agua de buena calidad
- Costo razonable

La parte estructural de un pozo se encuentra constituida por dos elementos principales:

- Cámara de bombeo
- Sección de admisión

La cámara de bombeo es la porción donde se aloja la bomba y el conducto vertical mediante el cual el agua asciende desde su nivel estático o dinámico hasta la introducción de la bomba. La porción de succión es la que se encuentra ademada con un tubo ranurado que permite el libre paso del agua y evita la filtración de material suelto.

El proceso de diseñar un pozo consiste básicamente en determinar los dos elementos principales mencionados anteriormente, por lo que bajo este contexto, se deben determinar y dimensionar los siguientes parámetros:

- Profundidad del pozo
- Diámetro y material de ademe
- Diámetro, material y apertura del cedazo
- El tipo de filtro y su protección sanitaria, que son determinantes para el mejor funcionamiento del pozo y la obtención de agua de buena calidad y libre de contaminantes

6.1. ADEMES

6.1.1. DIÁMETRO DEL ADEME

Determinar el diámetro apropiado del ademe es de suma importancia, ya que esto tiene repercusiones en el costo de la estructura del pozo y en el uso del equipo de perforación. Para elegir correctamente el diámetro del ademe se deben satisfacer dos necesidades principales:

- Que exista un espacio suficiente para el alojamiento de la bomba y un espacio libre que permita su instalación y mantenimiento

- El diámetro del ademe debe tener un espacio libre que garantice la buena eficiencia hidráulica del aprovechamiento en operación

El diámetro se determina de acuerdo al tamaño de la bomba por utilizar, que es función del gasto y la potencia requerida. De forma general, se recomienda que el diámetro del tubo del ademe sea 5 cm (2") mayor que el diámetro nominal de la bomba requerida. En la Tabla 6.1 se muestran algunas recomendaciones para determinar el diámetro del ademe en función del gasto que se espera obtener y en la Tabla 6.2 se presentan las máximas descargas de acuerdo a los diámetros del tubo de ademe.

Tabla 6.1 Diámetro del ademe en función al gasto esperado

| Gasto esperado (L/s) | Diámetro nominal de tazonos de bomba (mm) | Medida óptima del diámetro del ademe (mm) (pulg.) | Medida mínima del diámetro del ademe (mm) (pulg.) |
|----------------------|---|---|---|
| Menos de 6 | 102 | (152) Di (6") | (127) Di (5") |
| 5 a 11 | 127 | (203) Di (8") | (152) Di (6") |
| 10 a 22 | 152 | (254) Di (10") | (203) Di (8") |
| 20 a 44 | 203 | (305) Di (12") | (254) Di (10") |
| 30 a 60 | 254 | (356) DE (14") | (305) Di (12") |
| 50 a 115 | 305 | (406) DE (16") | (356) DE (14") |
| 75 a 190 | 356 | (508) DE (20") | (406) DE (16") |
| 125 a 240 | 406 | (610) DE (24") | (508) DE (20") |
| 190 a 380 | 508 | (782) DE (30") | (610) DE (24") |

DI: diámetro interior, DE: diámetro exterior

Tabla 6.2 Descarga máxima a partir del diámetro estándar del ademe

| Medida del ademe (mm) | Pulg. | Descarga máxima (L/s) |
|-----------------------|-------|-----------------------|
| (102) | (4") | 13 |
| (127) | (5") | 20 |
| (152) | (6") | 28 |
| (203) | (8") | 49 |
| (254) | (10") | 78 |
| (305) | (12") | 111 |
| (337) | (14") | 136 |
| (387) | (16") | 180 |
| (439) | (18") | 230 |
| (489) | (20") | 286 |
| (591) | (24") | 418 |

6.1.2. ESPESOR DE ADEME

El espesor del ademe juega un papel importante en el diseño de un pozo, ya que una de sus funciones, y muy importante, es la de evitar zonas factibles al derrumbe o colapso que perjudiquen severamente la estructura de un pozo.

El espesor del ademe depende de las condiciones del terreno. En zonas problemáticas, principalmente en sedimentos no consolidados cuyas circunstancias favorecen zonas de colapso, es necesario identificar los estratos problemáticos e incrementar el espesor del tubo en ellos.

Los tipos de suelos que con frecuencia presentan estos problemas son las arcillas blandas y los suelos colapsables. Durante la perforación del pozo se pone principal interés en

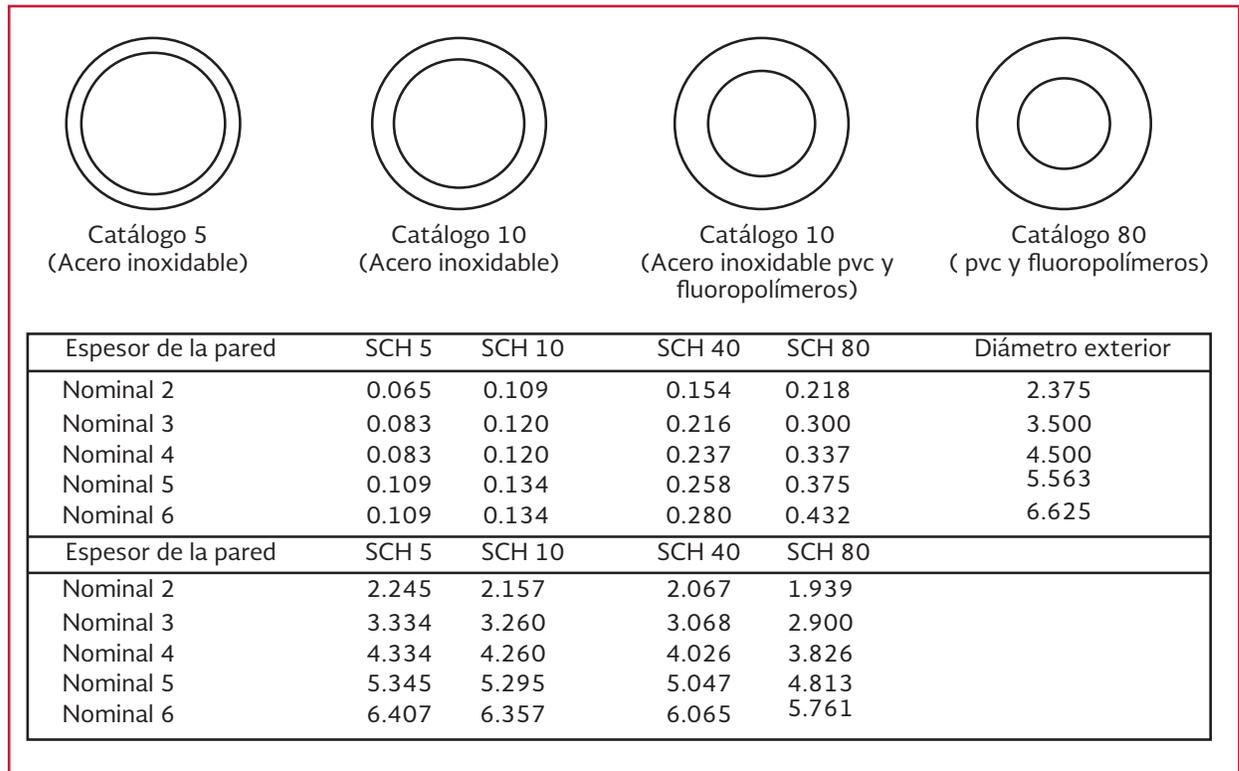
la identificación de estos suelos, para planear su tratamiento.

El diámetro exterior del ademe es por lo general de dimensiones estandarizadas, mientras que su diámetro interno es función del espesor de la pared del tubo del ademe.

El espesor del tubo por lo general se incrementa conforme aumenta su diámetro, sin embargo, no necesariamente siempre es así, ya que cuando se necesite incrementar el espesor del ademe, se incrementará su diámetro; en el mercado se encuentra una gran variedad de espesores de tubo (tipo 5, 10, 40 y 80. ilustración 6.1).

Por ejemplo, para un ademe de diámetro nominal de 2 pulgadas, se tiene una medida estándar de diámetro exterior de 2.375 pulgadas y espesores de 0.065 para el tipo 5, hasta 0.218 para el tipo 80.

Ilustración 6.1 Espesores y diámetros del ademe



6.1.3. TIPOS DE MATERIALES DEL ADEME

En la construcción de ademes para pozos de agua se emplean materiales que deben cumplir con ciertas características, por ejemplo, que sean de naturaleza tabular y lo suficientemente rígidos para soportar los esfuerzos ejercidos durante su instalación y aquellos que se presentan posteriormente.

Históricamente, la elección de estos materiales se llevaba a cabo tomando en cuenta también otros factores, principalmente en lo que se refiere a la durabilidad, a la resistencia y a su fácil manejo.

Hoy en día se toman en consideración además las características del acuífero en donde se instalará la tubería y el tipo de acuífero a explotar. Algunos de estos aspectos son:

- Marco geológico
- Ambiente geoquímico
- Profundidad del pozo
- Tipos y concentraciones de contaminantes en suspensión
- Diseño del pozo

Referente al tipo de materiales para la construcción de ademes, las características más relevantes que muestran una influencia directa en el desempeño del pozo son:

- Resistencia a los esfuerzos (tensión, compresión y colapso)
- Resistencia a la influencia química (corrosión e incrustación)

6.1.3.1. Resistencia a los esfuerzos

Los ademes deben ser lo suficientemente resistentes a los esfuerzos ejercidos sobre ellos durante su instalación y a los ejercidos por los sedimentos que los rodean. Estos esfuerzos se clasifican en tres tipos: tensión, compresión y de colapso (Ilustración 6.2).

La solución más factible para que el ademe resista estos esfuerzos es incrementar su espesor.

6.1.3.2. Resistencia química

Además de lo dicho, los materiales más usados en la construcción del ademe deben cumplir con ciertas características como:

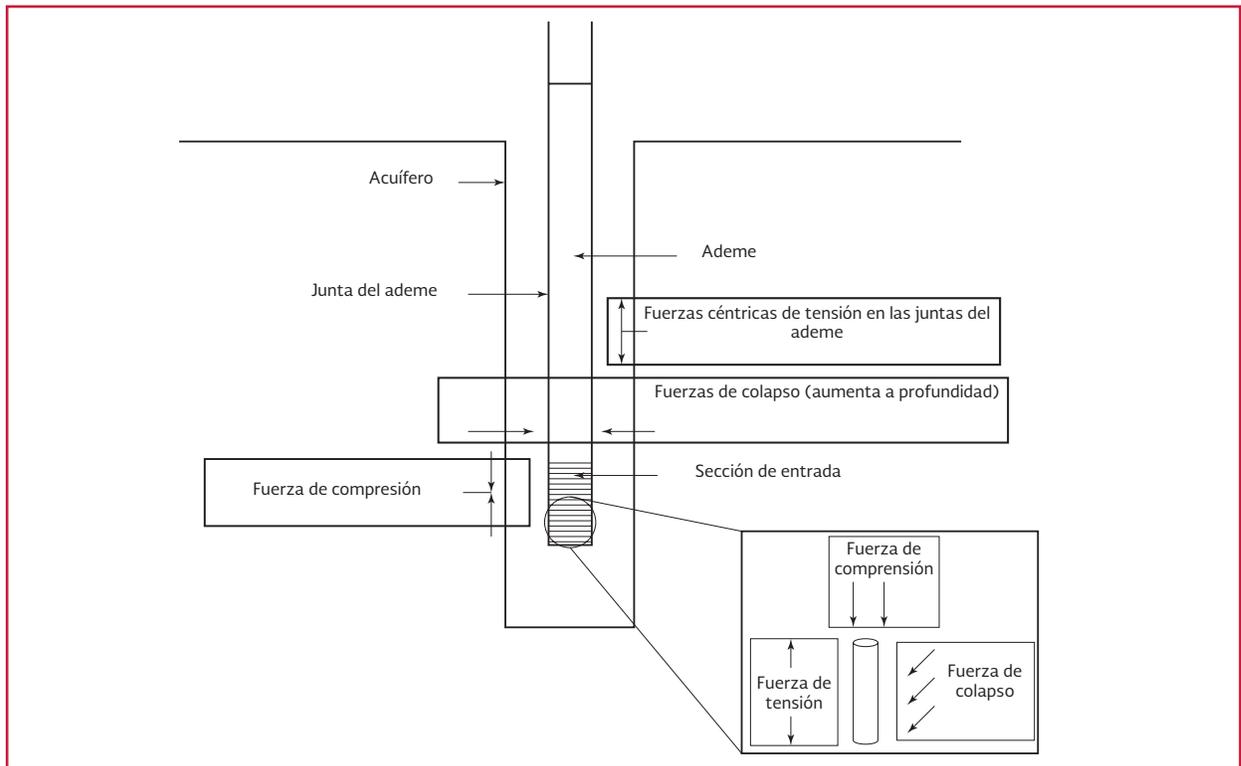
- Alta durabilidad
- Resistencia a la corrosión
- Resistencia a la degradación química

Por otro lado, hay una gran variedad y diversidad de materiales empleados en la fabricación de ademes, los que se dividen en tres categorías: los fluoropolímeros, los metálicos y los materiales termoplásticos.

Fluoropolímeros

Los fluoropolímeros son derivados directos de los monómeros, son de alta resistencia al ataque químico y biológico, a la oxidación, al intemperismo y a las radiaciones ultravioletas. Son ampliamente usados bajo condiciones de alta temperatura, en intervalos que sobrepasan los 290° C y tienen un bajo coeficiente de fricción.

Ilustración 6.2 Esfuerzos ejercidos sobre el tubo de ademe



- Politetrafluorotileno
- Tetrafluoroetileno
- Fluoronato, etileno, propileno
- Perfluoroalkoxy
- Fluorinato polivinil

Se pueden encontrar varios tipos de fluoropolímeros en el mercado, así como de fabricantes. En la Tabla 6.3 se muestran algunos de ellos.

Materiales metálicos

Los ademes para pozos de agua fabricados en materiales metálicos pueden ser de varios tipos. Los más comunes son acero, acero de alta calidad, acero galvanizado y acero inoxidable. Son de alta resistencia a los esfuerzos, rígidos y más resistentes a la temperatura que los materiales termoplásticos, los fluoropolímeros y la fibra de vidrio.

Tabla 6.3 Empresas que manufacturan ademes en fluoropolímeros

| Fluoropolímero | Nombre comercial | Fabricante | País de origen |
|------------------------------------|--|--|--|
| (PTFE) Politetrafluoroetileno | Teflón Halón, Fluón Hostaflón, Polyflón, Algoflón Soroflón | Dupont Allied Ici Hoechs Daikin Montedison Ugine kuhlman | E.U.A., Japón, Holanda E.U.A. E.U.A. Alemania Japón Italia Francia |
| (FEP) fluorinato-Etileno-propileno | Neoflón Teflón | Daikin Dupont | Japón E.U.A., Holanda, Japón |
| (pfa) perfluoroalkoxy | Neoflón Teflón | Daikin Dupont | Japón E.U.A., Holanda, Japón |
| (pvidf) polivinil | Kynar | Pennwalt | E.U.A. |
| (ctfe) Clorotrifluoroetileno | Kel - f Diaflón | 3m Daikin | E.U.A. Japón |

- Acero
- Acero de alta calidad
- Acero galvanizado
- Acero inoxidable

La desventaja más común en este tipo de materiales radica en su baja resistencia a la corrosión. Cuando se encuentran expuestos durante largo tiempo por debajo de la superficie y en contacto con el agua subterránea, son fácilmente atacados por los agentes corrosivos, limitando de esta manera su funcionamiento y la eficiencia del pozo a largo plazo.

A continuación se presentan algunas condiciones que favorecen el desarrollo de la corrosión:

- Bajo pH. En familias de agua cuyo potencial de hidrógeno sea menor de 7.0, se consideran como aguas ácidas que favorecen las condiciones de corrosión
- Alto contenido de oxígeno disuelto. Si el contenido excede los 2 mg/L se consideran aguas corrosivas
- Presencia de ácidos fuertes. La presencia de estas sustancias en altas concentraciones puede causar condiciones de corrosión severas
- Contenido de sólidos totales disueltos (STD). Si la cantidad de STD es mayor a 1000 mg/L o si la conductividad eléctrica del agua es elevada, por condiciones de corrosión electrolítica
- Dióxido de carbono (CO_2). Si el contenido de CO_2 excede los 50 mg/L, favorece la corrosión
- Ion cloro (Cl), si el contenido de cloro excede los 500 mg/L provoca alta corrosión

Materiales termoplásticos

- Cloruro-polivinil (PVC)
- Acrilonitril-butadiense-esfreno

Los materiales denominados termoplásticos son fabricados a partir de derivados orgánicos y con estos materiales también se manufactura una gran variedad de accesorios para el acoplamiento de ademes. Como se decía, este tipo de ademes pueden ser de cloruro polivinil conocido como PVC y de acrilonitrile butadiense styrene (ABS). Los materiales termoplásticos son más débiles, menos rígidos y más sensibles a la temperatura que los materiales metálicos. Sin embargo, son lo suficientemente resistentes a las condiciones de trabajo durante su instalación y posterior a ella.

Ventajas:

- Ofrecen una completa resistencia a la corrosión eléctrica y electroquímica
- No requieren de protección contra aguas de composición química variable
- Costo reducido en su instalación y traslado
- Alta resistencia a la abrasión
- Alta durabilidad en condiciones ambientales de aguas subterráneas
- Poco mantenimiento
- Alta flexibilidad
- Fácil acoplamiento durante su instalación

Cuando los materiales termoplásticos se encuentran expuestos durante largo tiempo a los rayos directos del sol y en consecuencia a los rayos ultravioleta, se hacen más frágiles y se provoca una pérdida en su resistencia a los esfuerzos ejercidos sobre ellos.

A temperaturas de 20° C los ademes de PVC resisten sin alteración:

- Todo tipo de aguas subterráneas
- Agua marina y solución salina
- Solución ácida diluida
- Solución alcalina diluida

En la Tabla 6.4 se resumen las propiedades físicas de estos materiales.

Adicionalmente, se cuenta con ademes fabricados en base a materiales de fibra de vidrio reforzado, aunque no está muy difundido su empleo.

Cada uno de estos materiales tiene características distintas a los esfuerzos ejercidos sobre ellos y a la influencia química. La elección de algunos de estos materiales se da en función de las condiciones hidrogeológicas y los tipos de contaminantes que presenten.

La Ilustración 6.3 muestra los tipos de uniones de ademes fabricados en PVC. La Ilustración 6.4 algunos de sus accesorios.

En la Tabla 6.5 se muestran algunas de las propiedades físicas de ademes para pozos:

Tabla 6.4 Se resumen las propiedades físicas de estos materiales

| Propiedades físicas | | Método de prueba | Norma UNE |
|--|-------------------------------|------------------|-----------------|
| Peso específico | 1.4 g/cm ³ | DIN 53479 | 4294 |
| Resistencia a la flexión (módulo elástico) | 2 500-3 000 N/mm ² | DIN53457 | 7219172 |
| Resistencia a la tracción | 45-55 N/mm ² | DIN53455 | 5819166 |
| Resistencia al choque a 20 °C | Rompe (máx. 10 %) | DIN53453 | 2.5076821773486 |
| Resistencia entalladura al choque a 20 °C | 3-5 kJ/m ² | DIN53453 | |

N = Newtons; kJ = Kilo Joules

6.1.4. PROCESO DE ACOPLAMIENTO ENTRE ADEMES

El proceso de acoplamiento o unión entre ademes es muy variado, depende del tipo de material y del tipo de aditamento de unión. En la Ilustración 6.5 se representan algunos tipos de uniones usados durante el ensamble de los tubos de ademes.

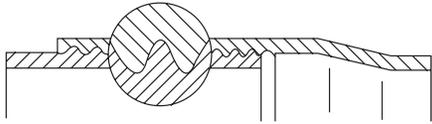
El acoplamiento se realiza de varias formas, dependiendo del tipo de material del ademe. En los fluoropolímeros se utilizan solventes puros. En materiales metálicos se tienen dos opciones, la primera mediante la aplicación directa de soldadura eléctrica y la segunda utilizando coples y roscados que se localizan en la terminación de cada tubo. Para ademes fabricados en materiales termoplásticos se utilizan solventes y juntas mecánicas (coples).

6.2. SECCIÓN DE ADMISIÓN

La sección de admisión es la parte inferior de la estructura de un pozo en la que el agua del acuífero entra hacia el interior del tubo de ademe. El diseño de la zona de succión o de admisión depende de varios factores que deben tomarse en cuenta y que se muestran a continuación.

Sistemas de unión

Tipo de unión con enchufe

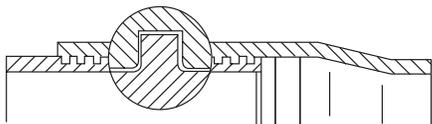


Rosca whitworth según norma DIN 2009
Rosca con 11 pasos por pulgada
DN 35 - 100

Resistencia a la tracción (rosca)*

| DN | ND | Whitworth |
|-----|-------|-----------|
| mm | inch. | kN* |
| 35 | 1 1/4 | 5 |
| 40 | 1 1/2 | 6 |
| 50 | 2 | 8 |
| 80 | 3 | 12 |
| 100 | 4 | 12 |

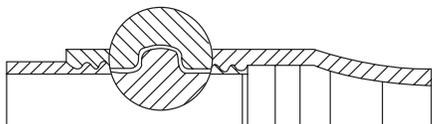
*1 kN = 100 kip



Rosca Trapezoidal
Paso 6mm : DN 100 - DN 200
Paso 12mm : DN 250 - DN 600

Resistencia a la tracción (rosca)*

| DN | ND | Whitworth |
|-----|-------|-----------|
| mm | inch. | kN |
| 100 | 4 | 20 |
| 115 | 4 1/2 | 20 |
| 125 | 5 | 30 |
| 150 | 6 | 40 |
| 175 | 7 | 40 |
| 200 | 8 | 80 |
| 250 | 10 | 110 |
| 300 | 12 | 150 |
| 350 | 14 | 200 |
| 400 | 16 | 200 |
| 500 | 20 | 200 |
| 600 | 24 | 200 |

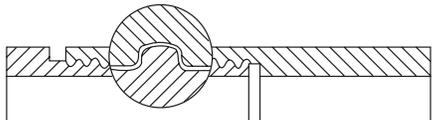


Rosca especial
Peso 14 mm : DN 250 - DN 600

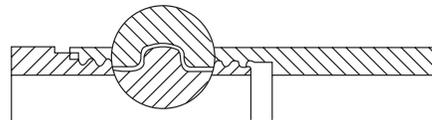
*Noticia :

La resistencia a la tracción de los filtros es de 40% inferior a la resistencia de los tubos

Tipo de unión sin enchufe



Rosca Trapezoidal
Paso 6mm : DN 100 - DN 200
Paso 12mm : DN 250 - DN 600



Rosca Especial
Paso 14mm : DN 250 - DN 600

Ilustración 6.4 Herramientas y accesorios

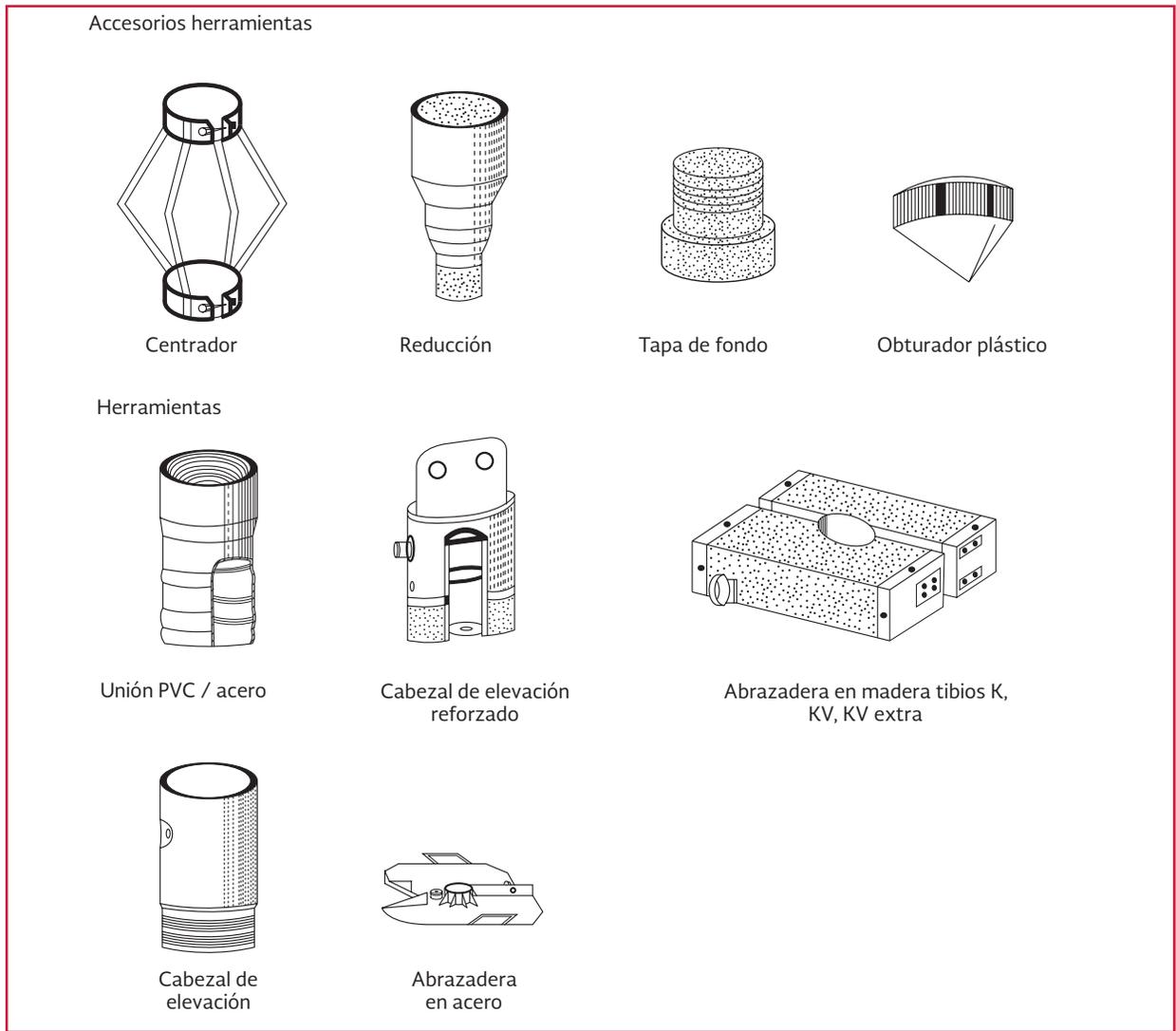
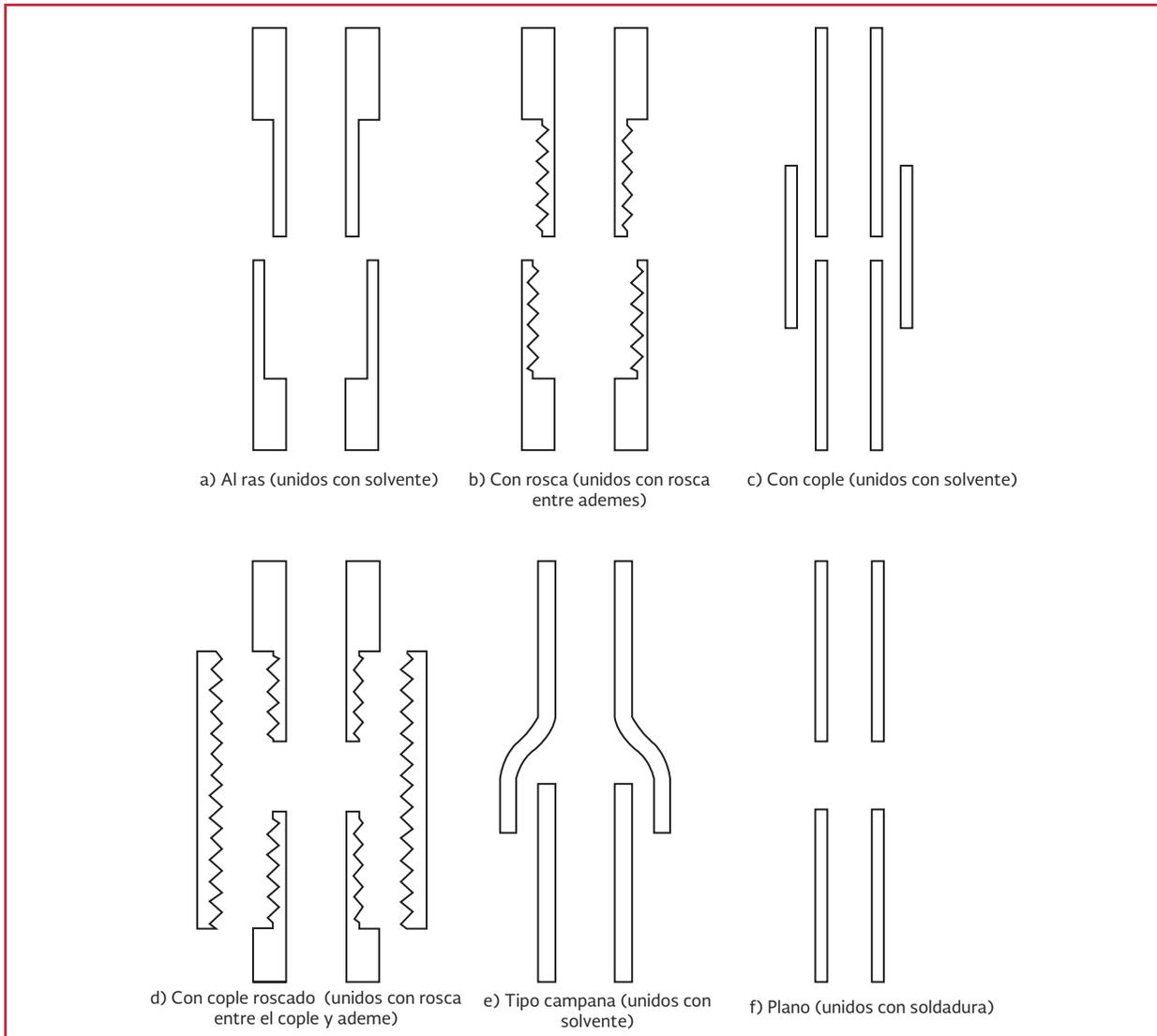


Tabla 6.5 Propiedades físicas de ademes para pozos

| Material | Gravedad específica | Fuerza de tensión (psi) | Módulo de tensión (105 psi) | Fuerza de impacto (psi-lb/plg) | Límite superior de temperatura (° F) | Expansión termal (105 pls/pis-°F) | Transferencia del calor blu-(plg/-pie-°F) | Absorción del agua (24/h) |
|--------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---|---------------------------|
| ABS | 1.04 | 4 500 | 3 | 6 | 190 | '53 | 1,35 | 0.3 |
| PVC | 1.4 | 8 000 | 4.1 | 1 | 150 | 3 | 1.1 | 0.05 |
| Engomado de estireno | 1.05 | 3 000 | 3.2 | 0.8 | 140 | | 0.8 | 0.15 |
| Fibra de vidrio | 1.89 | 16 750 | 23 | 20 | 300 | 8.5 | 2.3 | 0.2 |
| Cemento de asbesto | 1.85 | 3 | 30,0 | 1 | 2w | 1.7 | 0.56 | 2 |
| Acero de baja calidad | 7,85 | 35 000 | 300 | | 800-1 000 | 6.6 | 333 | NA |
| Acero inoxidable tipo304 | 8 | 50 000 | 290 | | 800-1 000 | 10.1 | 96 | NA |

Ilustración 6.5 Tipos de uniones usadas para el ensamble entre ademes



- Medida de la apertura de la rejilla
- Largo de la sección de admisión
- Tipos de rejillas
- Resistencia a la degradación química y a la corrosión

6.2.1. APERTURA DE LA REJILLA

La apertura de la rejilla debe tener una forma y tamaño que facilite el flujo del agua hacia el interior del pozo y al mismo tiempo que impida a las partículas más pequeñas del acuífero alojarse en ella, restringiendo de esta manera su flujo.

El material fino que ocupa parte de los espacios libres de la rejilla provoca una disminución de la permeabilidad de los materiales que contienen agua y un aumento en las pérdidas de carga por fricción, reduciendo de esta manera la cantidad de agua suministrada por el pozo.

Las aperturas del cedazo seleccionado deben de ser de tal dimensión que impidan que el material fino entre al pozo.

Esto implica que la granulometría del material que constituye al acuífero determina el tamaño

de las aperturas, por lo que se hace necesario un análisis granulométrico previo a la selección del cedazo.

En este análisis se usa un juego de tamices por donde se hace pasar una cantidad determinada de sedimentos, obteniéndose así la clasificación y la cantidad correspondiente de estos materiales. Posteriormente, con la representación gráfica (curva acumulativa) de estos resultados, se define el material predominante que establece, a su vez, el tamaño de la apertura del cedazo.

Para pozos formados de manera natural, las aperturas del cedazo deben seleccionarse de acuerdo a los criterios siguientes:

- Cuando el coeficiente de uniformidad es mayor que 6, la medida de apertura del cedazo debe retener de 30 a 40 por ciento del material de la formación
 - Cuando el coeficiente de uniformidad es menor que 6, la apertura del cedazo debe ser tal, que retenga entre 40 y 50 por ciento del material del acuífero
 - Si el agua proveniente del acuífero es corrosiva, o no se conoce su composición, es recomendable que el tamaño de apertura considere un 10 por ciento adicional a lo indicado anteriormente
 - Donde el estrato productor de la formación presente materiales de diferentes medidas y gradaciones y cuando el 50 por ciento de los granos sea de tamaño grueso y el otro 50 por ciento sea de sedimentos finos, la medida de la ranura se seleccionará con base en la granulometría del estrato fino o, en su defecto, se escogerán intervalos o secciones de diferentes medidas en la zona productora
- Cuando se encuentre arena fina sobre arena gruesa, se emplea una apertura de cedazo para material fino en los primeros 0.61 m (2 pies) de la arena gruesa subyacente. El tamaño de apertura para arena gruesa no debe ser más grande que el doble del tamaño de apertura para arena fina

En la Tabla 6.6 se muestra una correlación entre la apertura del cedazo (evaluado por tamices) y el tamaño de las partículas.

Para pozos en los que se debe colocar filtros de grava, las aperturas del cedazo deben retener entre el 85 y 100 por ciento del material fino contenido en la grava. En términos generales, se prefiere una apertura que retenga el 90 por ciento del material del filtro granular (Ilustración 6.6).

6.2.2. LONGITUD DE LA SECCIÓN DE SUCCIÓN

La longitud óptima del intervalo de succión está determinada de acuerdo al espesor y a la naturaleza de los estratos del acuífero. Algunos acuíferos tienen zonas productoras específicas con transmisividad elevada. De este modo, la longitud o el intervalo de admisión se ubica precisamente en ellas, en los lugares que presentan conductividad alta. La localización de estos estratos se puede determinar utilizando las siguientes técnicas:

- Mediante la interpretación de la bitácora de perforación, así como de algunas características identificadas durante la etapa exploratoria del pozo como la pérdida del lodo, variación de la penetración y avance de perforación

Tabla 6.6 Correlación entre la apertura del cedazo y el tamaño de las partículas evaluado por tamices

| Material geológico (Rango y medida del grano) | Johnson | núm. de gaza | Tyler | | Standar (E.U.A.) | |
|--|-----------|--------------|---------------|--------------------------------|------------------|------------------------|
| | Medida No | | núm. de tamiz | Medida de apertura Pulgadas mm | núm de tamiz | Medida de apertura piq |
| Arcilla y Alumn | - | - | 400 | 0.0015 0.038 | 400 | 0.0015 |
| | - | - | 325 | 0.0017 0.043 | 325 | 0.0017 |
| | - | - | 270 | 0.0021 0.053 | 270 | 0.0021 |
| | - | - | 250 | 0.0024 0.061 | 230 | 0.0024 |
| | - | - | 200 | 0.0029 0.074 | 200 | 0.0029 |
| Arena fina | - | - | 170 | 0.0035 0.088 | 170 | 0.0035 |
| | - | - | 150 | 0.0041 0.104 | 140 | 0.0041 |
| | - | - | 115 | 0.0049 0.124 | 120 | 0.0049 |
| | 6 | 90 | 100 | 0.0058 0.147 | 100 | 0.0059 |
| | 7 | 80 | 80 | 0.0069 0.175 | 80 | 0.007 |
| | a | 70 | 65 | 0.0082 0.208 | 70 | 0.0083 |
| | 10 | 60 | 60 | 0.0097 0.246 | 60 | 0.0098 |
| Arena media | 12 | 50 | 48 | 0.0116 0.295 | 50 | 0.0117 |
| | 14 | - | 42 | 0.0138 0.351 | 45 | 0.0138 |
| | 16 | - | 35 | 0.0164 0.417 | 40 | 0.0165 (1/62) |
| | 18 | 40 | - | 0.0180 0.457 | - | 0.018 |
| | 20 | - | 32 | 0.0195 0.495 | 35 | 0.0197 |
| | 23 | - | 28 | 0.0232 0.589 | 30 | 0.0232 |
| Arena gruesa | 25 | 30 | - | 0.0250 0.635 | - | 0.025 |
| | 28 | - | 24 | 0.0276 0.701 | 25 | 0,0280 |
| | 31 | - | - | 0.0310 0.788 | - | 0.0310 (1/32) |
| | 33 | - | 20 | 0.0328 0.833 | 20 | 0.0331 |
| | 35 | - | - | 0,035 0.899 | - | 0.035 |
| | 39 | - | 16 | 0.039 0.991 | 18 | 0.0394 |

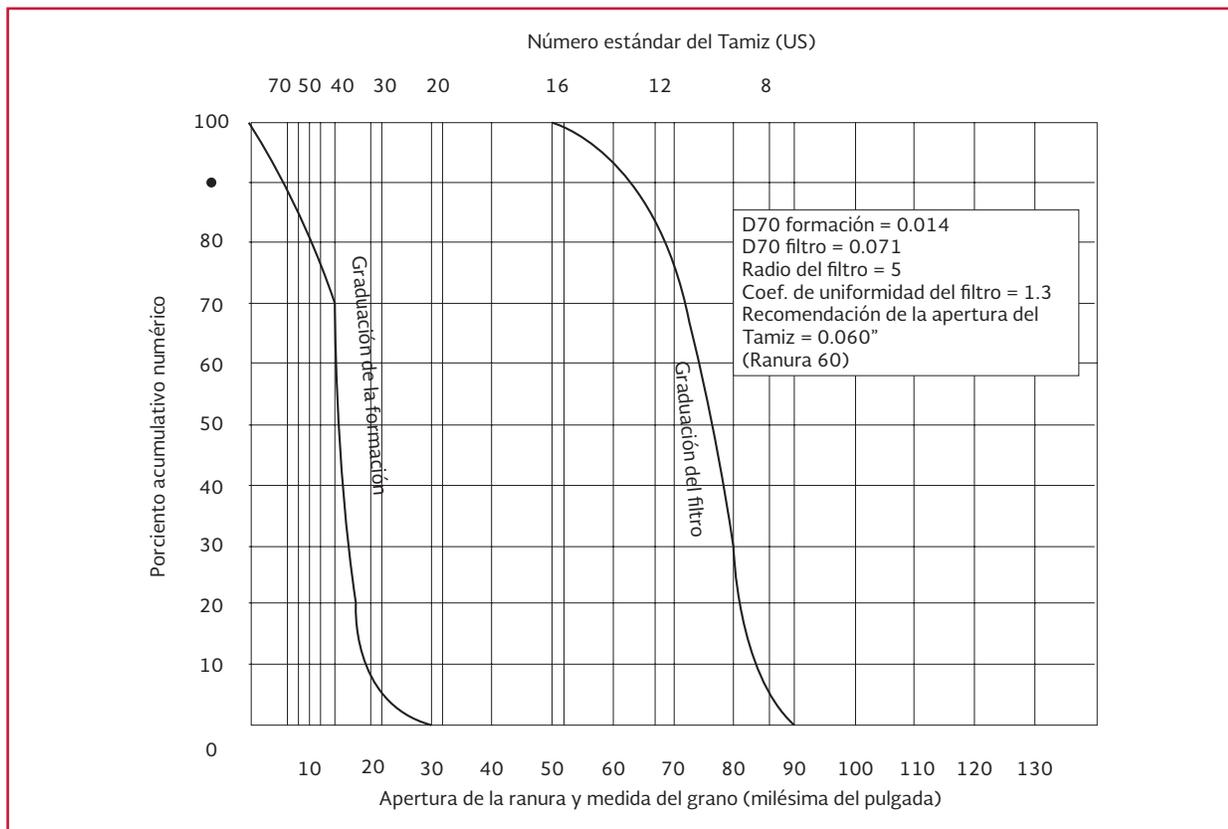
Tabla 6.6 Correlación entre la apertura del cedazo y el tamaño de las partículas evaluado por tamices (continuación)

| Material geológico | Johnson | número de gaza | Tyler | | Standar (E.U.A.) | |
|--------------------|---------|----------------|-----------------|--------------------------------|------------------|------------------------|
| | | | número de tamiz | Medida de apertura Pulgadas mm | número de tamiz | Medida de apertura piq |
| Arena muy gruesa | 47 | | 14 | 0.046 1.168 | 16 | 0.0469 |
| | 56 | | 12 | 0.055 1.397 | 14 | 0.0555 |
| | 62 | | - | 0.062 1.590 | - | 0.062 (1/16) |
| | 66 | | 10 | 0.065 1.651 | 12 | 0.0661 |
| | 79 | | 9 | 0.078 1.981 | 10 | 0.0787 |
| | 93 | | 8 | 0.093 2.369 | 8 | 0.0931 |
| Grava muy fina | 94 | | - | 0.094 2.390 | - | 0.094 (1/32) |
| | 111 | | 7 | 0.110 2.794 | 7 | 0.111 |
| | 125 | | - | 0.125 3.180 | - | 0.125 (1/6) |
| | 132 | | 6 | 0.131 3.327 | 6 | 0.132 |
| | 157 | | 5 | 0.156 3.962 | 5 | 0.157 |
| Grava fina | 187 | | 4 | 0.185 4.699 | 4 | 0.187 (1/16) |
| | 223 | | 3 ½ | 0.221 5.613 | 3 ½ | 0.223 |
| | 250 | | - | 0.250 6.350 | ½ | 0.250 (1/6) |
| | 263 | | 3 | 0.263 6.680 | | 0.253 |
| | 312 | | 2X | 0.312 7.925 | 1/16 | 0.312 (1/16) |
| | 375 | | 0.371 | 0.371 9.423 | 1/8 | 0.375 (1/8) |
| | 438 | | 0.441 | 0.441 11.20 | 1/10 | 0.438 (1/10) |
| | 500 | | 0.525 | 0.525 13.33 | 1/2 | 0.500 (1/2) |

- Inspección visual y comparación de las muestras representativas de los estratos de sedimentos
- Análisis granulométrico de las muestras tomadas de los estratos del acuífero, ya que la curva acumulativa puede proporcionar indicios de la conductividad hidráulica de las muestras. Esto es, curvas

- granulométricas cuyo intervalo de tamaños de grano es reducido, tiene conductividades hidráulicas altas, mientras que aquellas cuyo intervalo es amplio, debido a la heterogeneidad de tamaños, la conductividad hidráulica disminuye
- A partir de las conductividades hidráulicas de muestras del acuífero, puede

Ilustración 6.6 Elección de la apertura del cedazo con base a la granulometría del filtro



determinarse la transmisividad. Esta es equivalente al promedio de las conductividades hidráulicas de los estratos del acuífero

- Los registros geofísicos pueden indicar zonas de alta conductividad hidráulica

Otra forma de obtener la longitud del cedazo, tomando en cuenta las propiedades hidráulicas del acuífero por medio de la velocidad de entrada del agua al pozo, es mediante la siguiente fórmula:

$$L = \frac{Q}{7.48(Ae)(Ve)} \quad \text{Ecuación 6.1}$$

donde:

L = Longitud del cedazo (m)

Q = Caudal requerido por el cliente (m^3/s)

Ae = Área efectiva de apertura del cedazo (m^2/m)

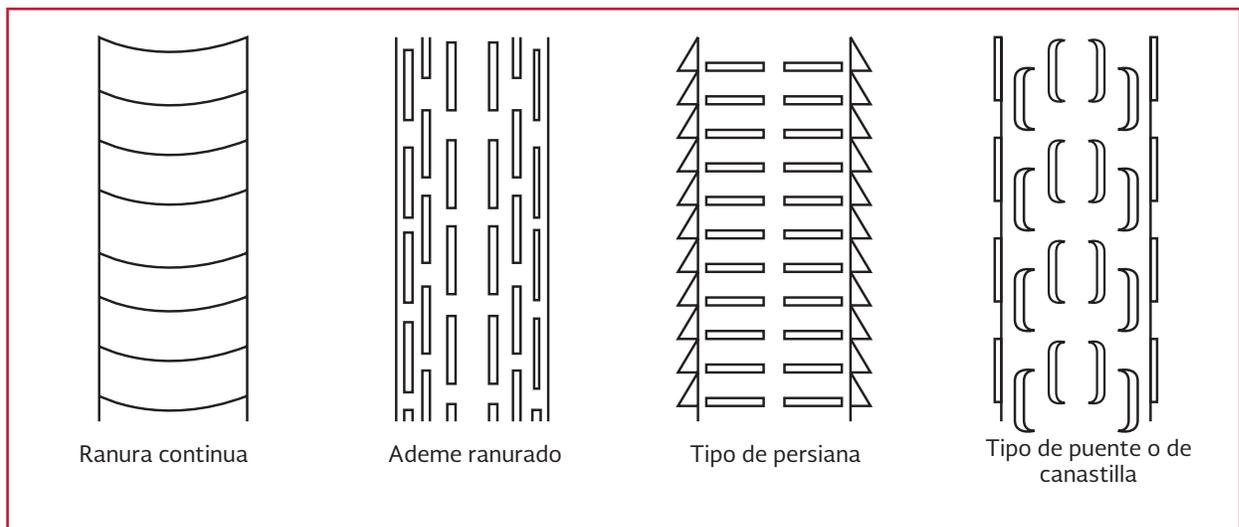
Ve = Velocidad de entrada del agua en el pozo (m/s)

6.2.3. TIPOS DE REJILLAS

La eficiencia hidráulica de un pozo depende básicamente del área de apertura de la rejilla, de tal forma que entre mayor sea el área de entrada, permitirá fluir el agua del acuífero hacia el interior del pozo con mayor facilidad.

La cantidad de área de filtración es una función del diámetro del ademe y del tamaño de la apertura de las ranuras. En el mercado nacional hay una considerable variedad en cedazos con diferentes tipos de ranuras (Ilustración 6.7). Destacan las siguientes:

Ilustración 6.7 Tipos de ademes ranurados



6.2.3.1. Tipo persiana

Fabricado en materiales sólidos, el número y medida de apertura depende de la firma que lo fabrica. En ademes de este tipo, el área de filtración es limitada.

6.2.3.2. Ranura tipo puente o de canastilla

Tiene un área mayor de filtración, disminuye pérdidas por fricción, fabricadas en materiales metálicos y presentan un bajo costo.

6.2.3.3. Ranurado mecánico

Se encuentra en medidas estándar con ranuras colocadas tanto horizontal como verticalmente. Está fabricado con materiales termoplásticos, con fluoropolímeros y con fibra de vidrio; en el mercado se encuentran con diámetro de 3/4 a 16 pulgadas.

6.3. FILTROS

La función principal de los filtros es la de impedir el paso de partículas, lográndose de esta

manera un mejor funcionamiento del pozo. Mediante la correcta elección diseño e instalación de filtros de grava en la zona que rodea inmediatamente el tubo de ademe, se obtiene una mayor permeabilidad y una mejor eficiencia hidráulica del pozo, así como una buena estabilización de los materiales del acuífero.

En aprovechamientos equipados únicamente con la rejilla del ademe y sin filtro, se logra retener aproximadamente 40 por ciento del material del acuífero y el porcentaje restante se filtra al interior del tubo.

La mayor parte de los filtros comerciales tienen un coeficiente de uniformidad de aproximadamente 2, aunque algunos alcanzan valores de 4 o 5, con los que se obtiene buenos resultados.

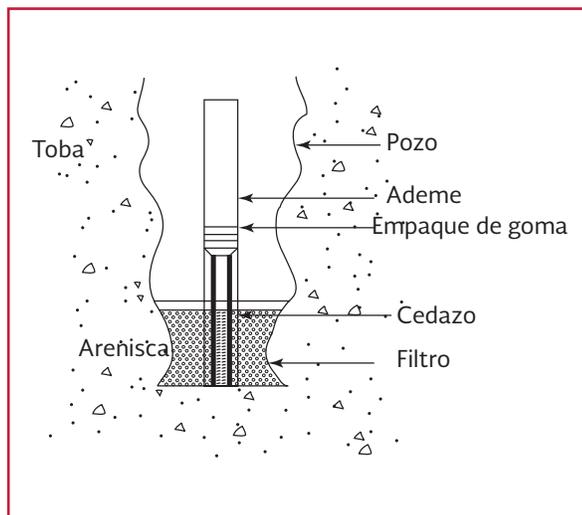
Las condiciones geológicas de los aprovechamientos hidráulicos pueden inducir a la utilización de filtros. A continuación se presentan algunos de ellos:

Arena fina uniforme. En pozos que extraen agua en arenas de granulometría fina, se reco-

mienda la utilización de filtros de grava, con el fin primordial de incrementar el tamaño de apertura de la rejilla, aumentando de esta manera la eficiencia del pozo.

Arenas semiconsolidadas. El principal problema en estos excelentes acuíferos es el riesgo al colapso de las paredes del pozo. Mediante un buen diseño y con la utilización de los filtros de grava, se prevé en gran medida el peligro de derrumbes y por otro lado se incrementa el apoyo lateral del ademe con las paredes del agujero. Al colocar este filtro, se puede aumentar el tamaño de la apertura de la rejilla, incrementando de este modo el rendimiento del pozo. En la Ilustración 6.8 se muestra el diseño de un pozo bajo estas condiciones.

Ilustración 6.8 Diseño del filtro de grava para un acuífero de arenisca semiconsolidada



6.3.1. DISEÑO DE FILTROS

Los aspectos fundamentales que se deben considerar para el diseño de filtros artificiales son los siguientes:

- Tamaño del grano del filtro
- Espesor del filtro
- Tipo de material del filtro
- Longitud total de la sección ranurada
- Tamaño de apertura de la ranura

En los párrafos siguientes se describirá la metodología para determinar el tamaño, el espesor y los materiales de los filtros artificiales.

6.3.2. TAMAÑO DEL GRANO DEL FILTRO

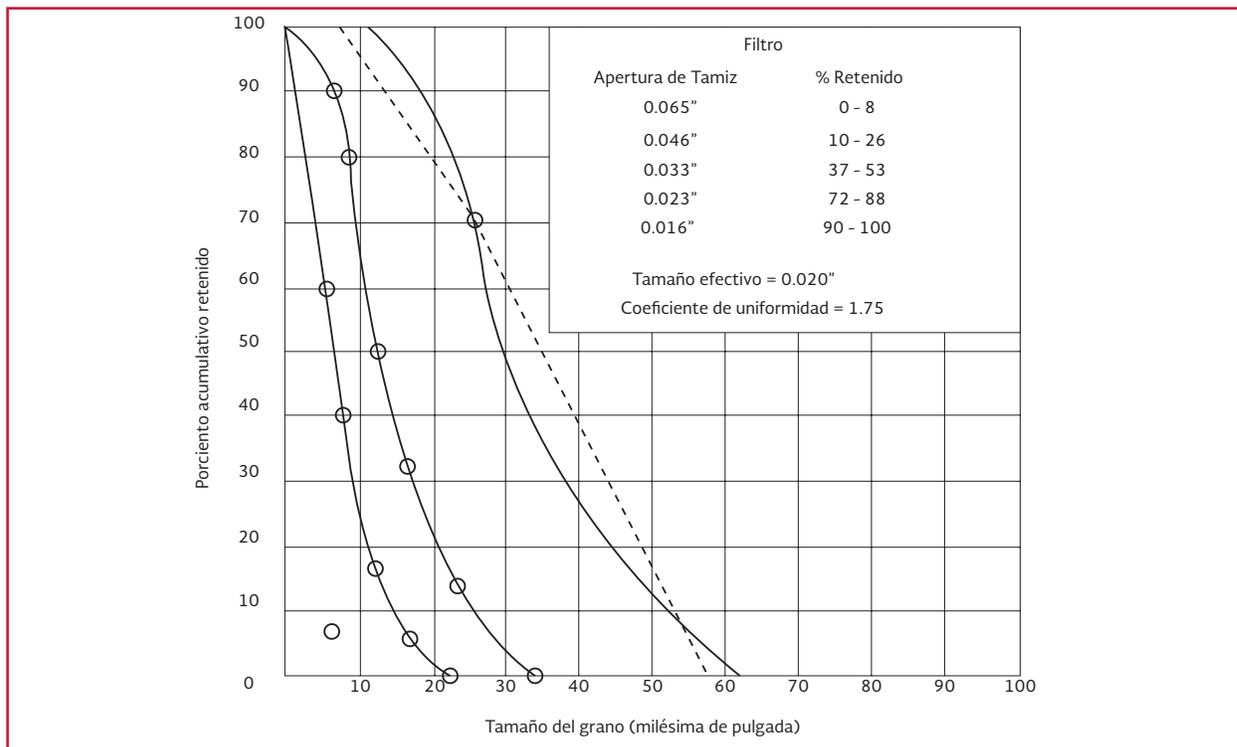
La elección del tamaño de grano del filtro de grava así como la apertura del cedazo se da en función de la granulometría del acuífero en su parte más fina.

Para elegir adecuadamente el tamaño de grano del filtro se sigue la metodología siguiente:

- **Muestras del acuífero.** Se obtienen muestras del material del acuífero
- **Curvas granulométricas.** Se construyen las curvas granulométricas de las diferentes muestras obtenidas (Ilustración 6.9)

Tamaño de grano del filtro. Se pueden considerar varios métodos para seleccionar el tamaño de grano del filtro. Sin embargo, en todos ellos, se considera como valor característico el tamaño promedio de la granulometría del acuífero, percentil 50 de la curva acumulativa. No obstante, este valor puede incrementarse hasta 70 por ciento, de tal forma que el cociente entre el filtro de grava y la formación en el punto seleccionado (percentil de 50 a 70), se encuentre dentro del intervalo de 6:1 a 4:1.

Ilustración 6.9 Curvas granulométricas: filtro y muestras del acuífero



- **Coeficiente de uniformidad.** El coeficiente de uniformidad del filtro de grava no debe exceder de 2.5
- **Curva de distribución.** La curva de distribución del filtro de grava debe ser paralela a la parte principal de la curva del acuífero
- **Selección de filtro de grava.** Se selecciona un filtro de grava con las características marcadas en la Tabla 6.7
- **Cedazo.** Se elige el cedazo que sea capaz de retener 90 por ciento del material fino del filtro
- **Volumen de filtro.** El volumen del filtro se determina con base en la Ilustración 6.8

4 veces el tamaño del grano, para que el filtro retenga los materiales de la formación productora. Sin embargo, en la práctica resulta imposible colocar filtros tan delgados, por ello, para asegurarse que el filtro rodee en su totalidad el cedazo, se recomiendan espesores de 8 cm como mínimo y 20 cm como máximo. Excederse de estos límites causaría problemas durante el desarrollo del pozo. Adicionalmente es recomendable que el cedazo cuente con centradores. En lo que se refiere a su longitud, debe extenderse por encima del cedazo por lo menos 6 m (20 pies).

6.3.3. ESPESOR DEL FILTRO

Partiendo de la teoría de gradación de los filtros, que se basa en la retención de las partículas del acuífero, basta con que su grosor sea solo 3 a

6.3.4. MATERIALES DEL FILTRO

Los materiales utilizados como filtros deben tener características de resistencia a la alteración química de las aguas subterráneas y a la limpieza de los pozos. Generalmente se sugiere la utilización de materiales cuya constitución primaria

sea de granos de cuarzo y un porcentaje menor que 5 por ciento de material no silíceo. Su peso específico promedio debe ser mayor a 2.5. Los granos no redondeados no deben exceder 2 por ciento en peso y no más de 5 por ciento debe ser soluble en ácido clorhídrico. El material debe estar lavado y desinfectado, libre de micas, arcillas e impurezas orgánicas, así como de hierro y manganeso, de tal forma que no se afecte la calidad del agua.

6.4. ESTABILIZADORES

Cuando la perforación de un pozo se realiza por el método rotatorio se obtiene como resultado un agujero cuyo diámetro es mayor que el diámetro del ademe. Bajo estas condiciones, se conoce como estabilización de la formación al proceso mediante el cual se rellena el espacio anular alrededor del tubo de ademe y la pared del agujero, evitando de esta manera que los materiales situados encima del acuífero se colapsen y formen socavaciones durante el proceso de desarrollo del pozo (tabla 6.9).

Se utilizan materiales cuya mezcla es menos uniforme que los utilizados como filtros, por lo que se pueden emplear arenas gruesas y mezclas entre arenas y gravas. La tabla 6.9 muestra algunas consideraciones para su elección.

6.5. PROTECCIÓN SANITARIA

Para aquellos aprovechamientos hidráulicos diseñados para abastecer de agua potable a comu-

nidades, se recomienda la utilización de aditamentos conocidos como protecciones sanitarias, empleados con el fin primordial de asegurar la obtención de agua de buena calidad, libre de contaminantes y segura para el consumo humano. De acuerdo con la estructura y diseño de pozos, hay dos áreas que son más susceptibles a la contaminación:

- Terminal superior del pozo
- Espacio anular entre las paredes del acuífero y el tubo de ademe

A continuación se presentan algunas sugerencias relacionadas con el terminado de pozos encaminadas a impedir la filtración de contaminantes en su interior:

- El entubamiento del pozo debe sobrepasar por lo menos 60 cm el nivel de la superficie del terreno
- La implantación sobre la superficie de una placa de concreto de por lo menos 10 cm de espesor por 60 cm de largo y ancho, con una ligera inclinación hacia sus bordes para drenar las posibles fugas del pozo
- Colocar un canal de drenaje alrededor de la placa de concreto, su descarga se extenderá a cierta distancia del pozo
- Implantar un sello en la parte superior para evitar en lo posible la entrada de contaminantes al interior del pozo

Tabla 6.7 Características y ventajas de los filtros

| Características | Ventajas |
|--|--|
| Limpieza | Poca pérdida del material durante el desarrollo |
| Redondez del grano | Alta conductividad hidráulica y porosidad Alta porosidad Más efectividad de desarrollo |
| 90 a 95 por ciento de granos de cuarzo | No se presenta pérdida del volumen por disolución de minerales |
| Coefficiente de uniformidad de 2.5 o menor | Disminución de pérdidas a través del filtro |

Tabla 6.8 Volumen requerido del filtro

| Diámetro del pozo | Diámetro externo del ademe del pozo | | | | | | | |
|-------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | 102 mm (4") m³/m | 162 mm (6") m³/m | 203 mm (8") m³/m | 264 mm (10") m³/m | 305 mm (12") m³/m | 406 mm (16") m³/m | 467 mm (18") m³/m | 608 mm (20") m³/m |
| 203 mm (8") | 0.03 | 0.01 | - | | | | | |
| 254 mm (10") | 0.04 | 0.03 | 0.02 | - | | | | |
| 305 mm (12") | 0.07 | 0.06 | 0.04 | 0.02 | - | | | |
| 406 mm (16") | 0.12 | 0.11 | 0.10 | 0.08 | 0.06 | - | - | |
| 508 mm (20") | 0.20 | 0.19 | 0.18 | 0.15 | 0.13 | 0.07 | 0.04 | - |
| 610 mm (24") | 0.28 | 0.27 | 0.26 | 0.24 | 0.22 | 0.16 | 0.13 | 0.09 |
| 782 mm (30") | 0.45 | 0.44 | 0.43 | 0.41 | 0.39 | 0.29 | 0.29 | 0.26 |

Tabla 6.9 Elección de estabilizadores para acuíferos no-consolidados y semi-consolidados

| | | |
|---|--|--|
| Tipo de acuífero | Acuíferos no consolidados: arenas y gravas de depósitos aluviales y fluviales Depósitos de playa | Acuíferos semiconsolidados, aluviones y formaciones que contienen una cubierta arenosa |
| Propósito | Proporcionar un soporte entre las paredes del pozo y la rejilla | Retención mecánica de partículas pequeñas |
| Características de los estabilizadores | Distribución similar de tamaño del grano a todo lo largo de la formación original | La distribución del tamaño del grano es usualmente mayor que 12 o 13 Tamices de 70 por ciento de retención |
| Desarrollo | Aproximadamente de 50 a 60 por ciento de los estabilizadores son removidos durante el desarrollo natural | Ninguna de las partículas pasan a través de la rejilla durante el desarrollo |
| Resultados | Las partículas de los estabilizadores de la formación permanecen próximas a la rejilla por conductividades hidráulicas similares, los estabilizadores juegan un mejor papel en la prevención de la migración de las partículas finas al interior de la rejilla | Las partículas de la formación no pueden desplomarse enfrente de la rejilla, la porosidad y conductividad específica de los estabilizadores es alta, reduce la inmediata vecindad con la rejilla |



7

TERMINACIÓN, DESARROLLO Y DESINFECCIÓN DE POZOS

Una vez concluidas las etapas de perforación exploratoria y de ampliación, se procede a la terminación y a las operaciones de limpieza y de desarrollo así como a la desinfección del pozo.

7.1. TERMINACIÓN

La terminación del pozo debe iniciarse lo más pronto posible después de concluir la etapa exploratoria, ya que mientras más tiempo transcurre, más difícil y menos efectiva es la reparación del daño causado a las formaciones acuíferas por la perforación.

7.1.1. ADEMADO (ENTUBADO)

En primer lugar, se hace circular agua limpia a través del pozo con objeto de extraer el azolve acumulado y dejarlo totalmente limpio para proceder al ademado. Seguidamente, con base en el diseño del pozo, se hace una relación de la tubería que se va a instalar, de preferencia, numerando los tramos en el orden en que van a introducirse. Cada tramo debe alinearse, nivelarse y colocarse a tope con los adyacentes, a fin de asegurar la verticalidad del entubado. La tubería debe entrar holgadamente en el agujero, quedando descartado su hincado a golpes. Los tramos se conectan con soldadura de doble cor-

dón al arco eléctrico, tipo E 7018 o equivalente, cuando se trata de tubería de acero. Cuando la tubería a colocar es de PVC, los tramos se unen por coples o por medio de roscas de diferentes tipos.

A menos que se tengan instrucciones específicas, la altura del ademe sobre la superficie del terreno debe extenderse por lo menos 61 cm (24 pulg), misma distancia que debe conservar por encima del nivel máximo de inundación registrado durante los últimos 100 años. Por otra parte, el terreno que rodea la cima del ademe debe contar con una pendiente hacia afuera del pozo, para prevenir escurrimientos hacia adentro del mismo (Association American Water Works, 2006). Una vez que se concluye su colocación, la tubería se gira y se deja tensada con el propósito de asegurar su verticalidad. A continuación, se vuelve a introducir la sarta de perforación para reanudar la circulación del fluido de perforación e iniciar la colocación del filtro de grava.

7.1.2. ENGRAVADO

El filtro de grava se instala en el espacio anular entre el cedazo (y ademe) y las paredes de la perforación, para mantener la verticalidad y la posición rígida de la tubería. Es neces-

rio para incrementar la permeabilidad en el entorno del pozo, facilitar el desarrollo de las formaciones acuíferas granulares y asegurar su estabilidad, así como para prevenir o retardar la incrustación del cedazo en el caso de los acuíferos carbonatados.

Si el pozo no corta materiales sueltos o formaciones deleznable, puede prescindirse del filtro de grava. Aún más, cuando se cortan rocas consolidadas fracturadas o con conductos de disolución, no es indispensable la colocación de tubería, aunque es recomendable, en todo caso, instalar un casquillo de tubería lisa desde la superficie hasta el nivel freático para dar a la captación protección sanitaria.

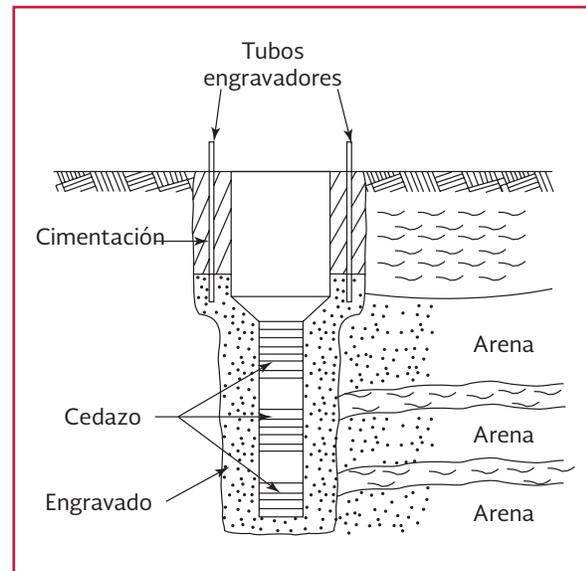
Durante su instalación, el filtro debe desinfectarse. Su colocación se inicia con el fluido en circulación para extraer los finos mezclados con la grava. La viscosidad del fluido no debe ser mayor que 30 segundos en promedio, de manera que no desplace hacia arriba las partículas menores del filtro, cuyo peso específico promedio no debe ser menor a 2.5. La grava se descarga en el espacio anular, en carretillas de 100 litros, llevando un control del volumen introducido (Association American Water Works, 2006).

Durante el proceso, con una sonda se mide el nivel del filtro en el espacio anular y se compara el volumen de grava introducido con el teórico respectivo, con objeto de deducir si hay oquedades en las formaciones o si se ha formado algún puenteo en el filtro.

El filtro también puede colocarse utilizando tubos engravadores, que se introducen en el espacio anular hasta que su extremo inferior queda bajo los estratos más erosionables por el

paso de la grava. Esta se introduce en los tubos por medio de un embudo y se lleva un control de su nivel para levantar gradualmente los tubos alimentadores. Este último procedimiento es más conveniente que el primero, aunque más lento (Ilustración 7.1).

Ilustración 7.1 Tubos engravadores



7.1.3. CEMENTACIÓN

Esta actividad se realiza con objeto de dar rigidez a la cámara de bombeo y protección sanitaria al pozo, previniendo así el ingreso de agua superficial contaminada a través del espacio anular.

La cementación es una operación rutinaria en la terminación del pozo y también es común en la rehabilitación de pozos. Cuando se emplea para formar un sello sanitario superficial, esta no debe ser menor a 3.8 cm (1.5 pulg) (AWWA A100-06 Water Wells , 2006)

Para llevar a cabo la cementación o el sellado de ademe o contrademe, se amplía el agujero a un diámetro mayor de 10 a 15 cm (4 a 6"), del existente en la cámara de bombeo, hasta la profundidad prefijada. La cementación se realiza por

gravidad o, de preferencia, con el sistema Halliburton, mediante empacadores colocados en posición tal, que el tramo a sellar quede aislado.

Cuando no es posible ampliar el pozo para la colocación y la cementación del contrademe, se procede de la siguiente forma:

Una vez que se haya terminado la perforación, la ampliación y el colocado del ademe y del filtro de grava seleccionado, hasta la profundidad que se pretende sellar, se colocan inmediatamente a partir de la porción superior de la grava, dos tubos engravadores de diámetro correspondiente al espacio anular. Luego se coloca un colchón de arcilla de 2 a 3 m de longitud sobre la grava y se procede al vaciado de la lechada de cemento, con una longitud similar a la de la arcilla, dejando un tiempo de fraguado suficiente. Finalmente, se coloca la lechada de cemento en todo el tramo faltante. De esta manera los tubos engravadores quedan ahogados en la cementación y en contacto con la parte superior del a grava, así el filtro puede alimentarse para mantener su nivel en caso de que haya compactación durante la operación del pozo.

7.2. DESARROLLO

7.2.1. OBJETIVOS

Todos los métodos de perforación, en mayor o menor medida, modifican las características hidráulicas naturales de las formaciones en la vecindad inmediata del pozo. La acción de la herramienta de perforación y, especialmente,

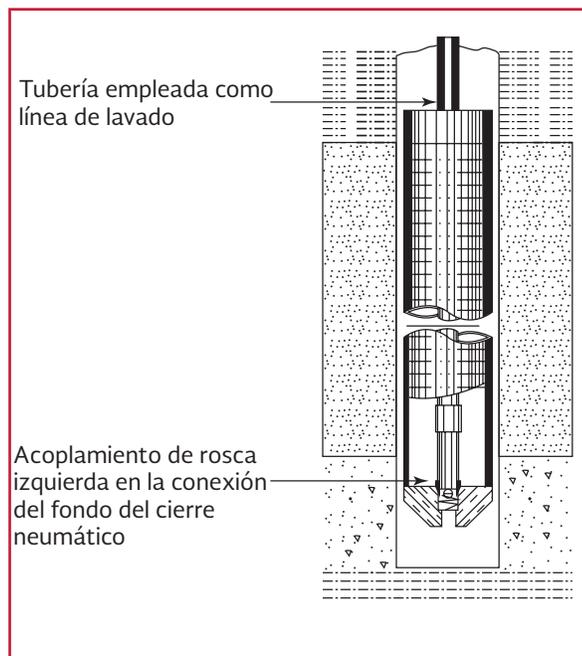
el mal empleo del fluido de perforación, reducen la porosidad y la permeabilidad de los materiales acuíferos, por compactación, colmatación y fixotropía.

La compactación es causada por la vibración y el impacto de la herramienta en el interior del agujero. La colmatación consiste en la introducción y el empaqueo de sedimentos finos en los poros y fisuras de las formaciones y la fixotropía es la resistencia creciente que opone la componente arcillosa del fluido de perforación a ser removida, con las partículas sólidas, conforme aumenta el tiempo en contacto entre ambas.

El desarrollo y la limpieza tienen por objeto reparar el daño causado a las formaciones acuíferas durante la perforación. Por una parte, eliminando los sedimentos y el fluido de perforación del interior del agujero, de las paredes y de las formaciones, y por la otra, removiendo los materiales finos propios de las formaciones granulares. Como resultado, la porosidad y la permeabilidad son restituidas y aun incrementadas en el entorno del pozo, por lo que se eleva la eficiencia hidráulica del mismo y se obtiene agua libre de sólidos en suspensión.

La operación se prolonga durante el tiempo necesario hasta que el agua inyectada retorne limpia a la superficie. El lavado previo a la instalación del cedazo emplea un intenso chorro de agua desde un fondo de lavado, con el fin de aflojar la arena y formar un pozo y acuífero libre de sedimentos y de materiales finos (ilustración 7.2).

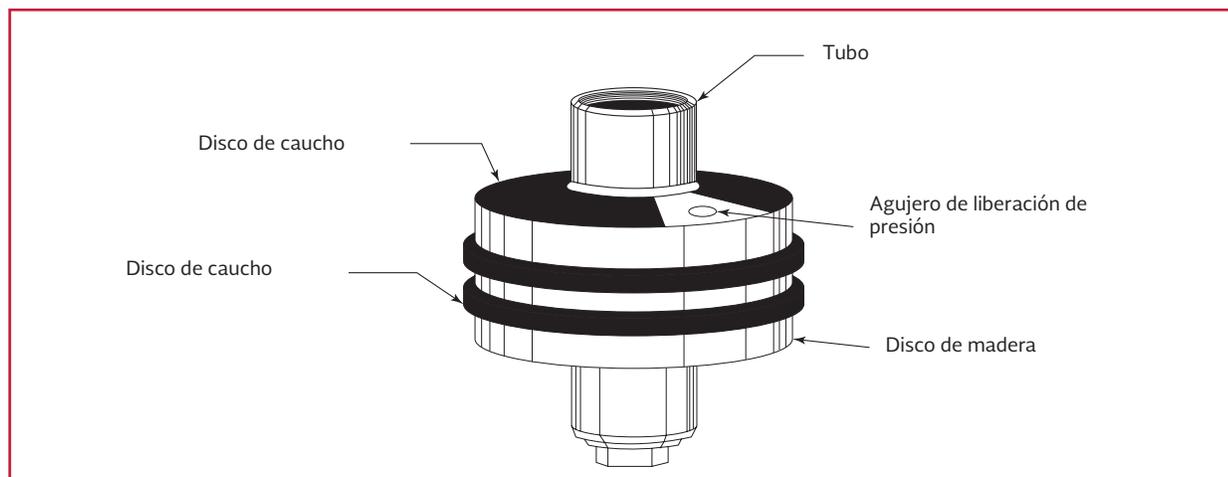
Ilustración 7.2 Método de limpieza



7.2.2. MÉTODOS DE DESARROLLO

El desarrollo del pozo es una actividad que se lleva a cabo inmediatamente después de concluida su limpieza. Consiste en la remoción del sedimento, la arena fina y otros materiales de una zona inmediata alrededor del cedazo, con lo cual se mejora el flujo del agua hacia dentro del pozo. Hay una gran variedad de métodos de desarrollo, los más comunes son: el pistoneo, el sifoneo, el chifoneo y el sobrebombeo.

Ilustración 7.3 Pistón de limpieza



7.2.2.1. Pistoneo

En este método se utiliza un émbolo o pistón que consta de dos discos de caucho, montados entre discos de madera y montados sobre un niple de tubería con platillos de acero que funcionan como rondanas bajo el extremo de los acoplamientos, permitiendo el ajuste estrecho del pistón con el ademe (Ilustración 7.3).

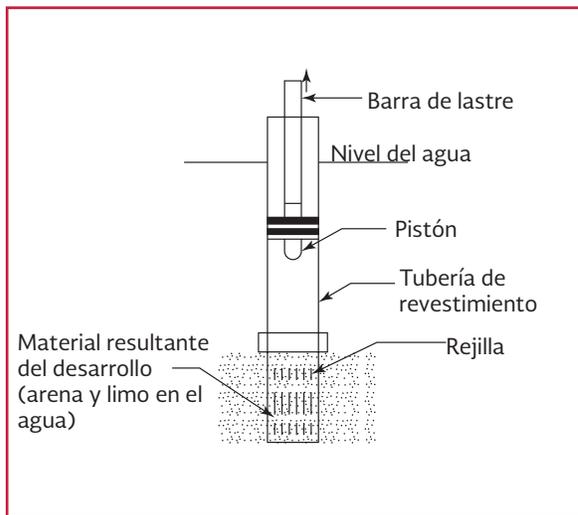
Otro tipo de pistón, denominado de válvula, tiene en el émbolo numerosos orificios pequeños cubiertos por una válvula de caucho suave, que succiona el agua de la formación en su carrera ascendente y permite que el agua en el interior del pozo ejerza presión hacia arriba en su carrera descendente.

Antes de iniciar la operación, se verifica que el pistón pueda deslizarse libremente a lo largo del ademe. Si el lodo y los sedimentos finos obstaculizan el libre paso del agua a través de la pared del pozo, el pistoneo produce grandes presiones diferenciales que pueden colapsar el ademe.

Verificado lo anterior, se introduce el émbolo conectado a la tubería de perforación hasta la profundidad correspondiente al extremo supe-

rior del cedazo. A partir de ese punto, el pistoneo se realiza recorriendo el pozo en forma descendente, por tramos de uno a tres metros de longitud, hasta llegar a su fondo o al extremo inferior del cedazo (Ilustración 7.4).

Ilustración 7.4 Desarrollo por pistoneo



El movimiento recíprocante del pistón provoca el flujo y reflujo del agua a través de la pared, removiendo el lodo y los sedimentos finos de las formaciones hacia el interior del pozo.

A cada cierta longitud desarrollada, se extrae el émbolo y se introduce la cuchara para extraer el producto del pistoneo, acumulado en la parte inferior del agujero. Ambas operaciones se alternan hasta alcanzar el fondo del pozo.

Se recomienda que toda la operación de pistoneo tarde por lo menos un día, tiempo total que puede ser uniformemente distribuido entre el número de tramos a desarrollar. También es recomendable el empleo de un equipo de perforación a percusión o rotario equipado con malacate.

7.2.2.2. Sifoneo

Este método de desarrollo es uno de los más efectivos y comúnmente empleados. Se aplica por medio de una unidad neumática constituida por un compresor con capacidad para operar presiones de 1.724 a 2.413.41 MPa (17.58 a 24.61 kg/cm² o 250 a 350 psi) y volúmenes de 0.92 a 1.7 m³/min (325 a 600 pies cúbicos por minuto), mangueras de succión y de descarga, y una línea de aire de acero o una tubería principal y dos laterales para efectuar el sifoneo.

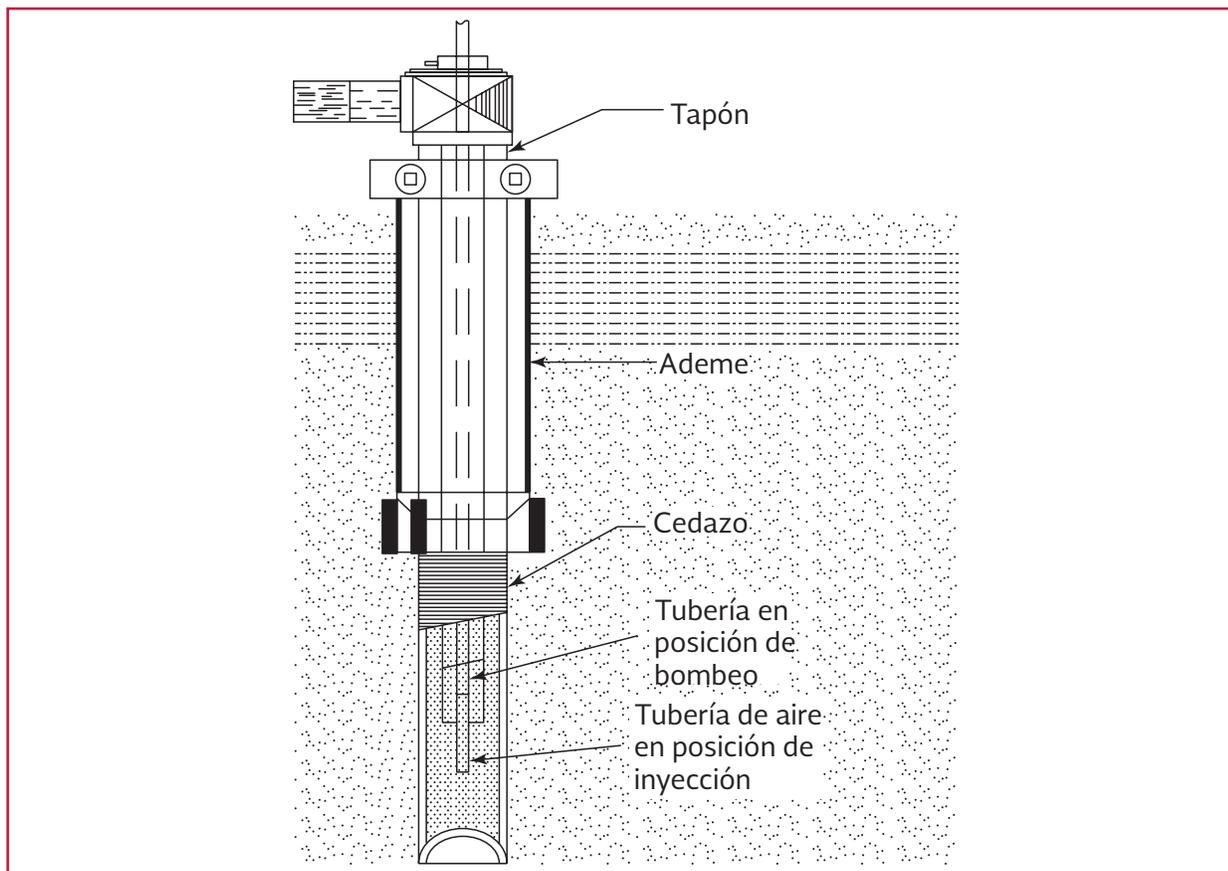
El sifoneo se lleva a cabo por tramos, del fondo del pozo o del extremo inferior del cedazo hacia arriba, hasta llegar al extremo superior del pozo o al nivel estático. La presión de operación del compresor aumenta de abajo hacia arriba y depende de la profundidad del tramo que se está desarrollando y de la profundidad al nivel del agua en el interior del pozo (Ilustración 7.5)

Una vez colocada la línea de aire en el extremo inferior del tramo a desarrollar, se inicia la inyección para remover de las paredes los sedimentos finos y el fluido de perforación, los que son extraídos del pozo, mediante una de las líneas laterales.

Terminada la limpieza del tramo, se levanta la línea de aire para continuar con el siguiente y así sucesivamente hasta recorrer toda la longitud a desarrollar.

Este método se puede aplicar a cámara cerrada, colocando una placa de fierro soldada al brocal del pozo, con un empaque de hule que sella her-

Ilustración 7.5 Desarrollo por sifoneo



méticamente el contacto entre aquella y la línea de aire. De esta manera, la presión de inyección expulsa el aire y los sedimentos a través del espacio anular engravado.

La acción del desarrollo es más enérgica si se coloca una llave de paso en la placa y se abre periódicamente durante la operación de limpieza.

Para que el sifoneo sea eficiente es necesario que cuando menos 40 por ciento de la longitud de la línea de aire esté sumergida y que el extremo inferior de la tubería principal de retorno se encuentre aproximadamente 15 m abajo del extremo de la línea de inyección.

Se recomienda que el sifoneo tenga una duración total mínima de 48 horas, tiempo que es

repartido uniformemente entre la longitud a desarrollar.

7.2.2.3. Chiflones

El chifloneo consiste en la expulsión de agua contra las formaciones acuíferas a través del cedazo, por medio de varios chiflones distribuidos horizontalmente en la periferia de un cilindro de acero, acoplado a la tubería de perforación, de diámetro mayor o igual que el de la tubería y con longitud aproximada de un metro.

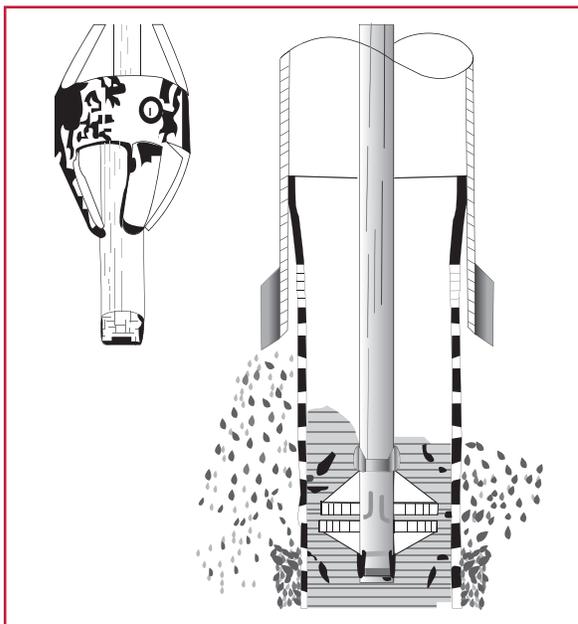
Los chiflones son orificios de 0.48 a 0.64 cm (3/16" a 1/4") que expulsan el agua horizontalmente con alta velocidad. La presión del agua es generada por una bomba de lodos y transmitida

a la tubería de perforación mediante una manguera conectada al swivel. Generalmente, se utiliza la misma bomba de lodos que en la etapa de perforación, la cual debe tener capacidad para generar presiones de 1.72 a 2.24 MPa (17.58 a 22.85 kg/cm² o 250 a 325 psi) e inyectar un caudal de agua de 5 a 14 L/s.

El procedimiento consiste en la introducción del dispositivo de inyección hasta las proximidades del fondo del pozo. Mientras se bombea el agua contra la formación acuífera, se hace girar lentamente el dispositivo. Después de aplicar el chifloneo durante cierto tiempo, se eleva el dispositivo un metro y se repite la operación, y así sucesivamente, hasta desarrollar todo el tramo del pozo con tubería ranurada (Ilustración 7.6).

La operación completa suele tener duración de 48 horas, tiempo que se distribuye uniformemente entre la longitud de desarrollo. El agua que retorna a la superficie se desecha, no se recircula, ya que sale cargada de lodo y de sólidos en suspensión.

Ilustración 7.6 Desarrollo por chifloneo



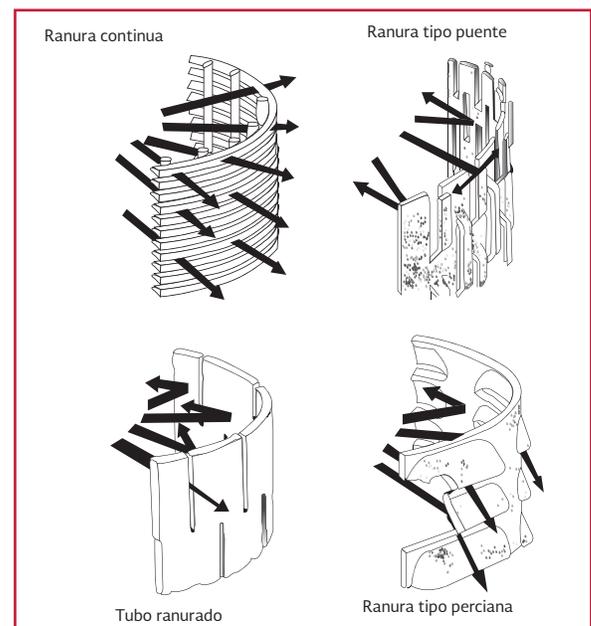
Este método de desarrollo es el más efectivo cuando el pozo está entubado con cedazo de ranura continua (helicoidal), pues en ese caso la mayor parte de la energía de los chorros de agua actúa sobre las formaciones y poca se desperdicia en la parte sólida del cedazo. Por el contrario, el método es poco recomendable cuando el cedazo es de otro tipo (Ilustración 7.7).

7.2.2.4. Sobrebombeo

Este método de desarrollo consiste en la extracción discontinua de agua del pozo por medio de una bomba para provocar el flujo y reflujo del agua en las formaciones acuíferas, a fin de que se desprendan el lodo y los sedimentos finos de las formaciones y puedan ser removidos con el agua bombeada.

La bomba a utilizar puede variar dependiendo, en parte, de la profundidad al nivel del agua. En pozos con niveles someros de hasta 15 m se puede emplear una bomba centrífuga con capacidad de hasta 15 L/s, con una manguera de succión que se introduce abajo del nivel del agua. La manguera debe

Ilustración 7.7 Comportamiento del flujo por chifloneo en diferentes tipos de cedazos



estar provista con una válvula de compuerta en su extremo.

En pozos con niveles de agua más profundos se utiliza una bomba vertical de pozo profundo. En todo caso, el equipo de bombeo debe tener capacidad suficiente para extraer caudales superiores al que se pretende extraer durante la operación normal del pozo.

La operación consiste en bombear el pozo durante un intervalo de tiempo de varios minutos. Luego se suspende la extracción de tal manera que el agua que se encuentra en el interior de la columna de succión regrese hacia el pozo, induciendo el flujo hacia el interior de las formaciones acuíferas.

El procedimiento se repite manteniendo constante el caudal, hasta que el agua sale cada vez más limpia de sedimentos en suspensión. A continuación, se varía el caudal para provocar condiciones hidrodinámicas diferentes en el entorno del pozo y se repite el procedimiento de bombeo intermitente. Y así, sucesivamente, hasta que el agua salga limpia para cualquier gasto dentro del intervalo cubierto por la bomba.

Durante la operación de limpieza, se realizan mediciones de la profundidad a los niveles estático y dinámico, para conocer su variación en cada etapa. Conforme progresa el desarrollo, se aumenta la permeabilidad del acuífero en las inmediaciones del pozo, de manera que el abatimiento provocado por un mismo gasto suele decrecer gradualmente y en ocasiones, la posición del nivel estático en el pozo va mostrando la carga hidráulica en las formaciones acuíferas al removerse el lodo de ellas.

7.2.2.5. Observaciones generales

Cualquiera que sea el método utilizado, es recomendable un predesarrollo químico o tratamiento con polifosfatos, comúnmente conocidos como dispersores de arcillas. Esto se logra agregando una proporción de 20 litros por cada 30 m de longitud de desarrollo, con el objeto de facilitar la remoción del lodo de perforación, dejándolo en reposo un tiempo mínimo de 24 horas, antes de iniciar las operaciones de limpieza.

La duración total recomendada para la aplicación de cada método de desarrollo, debe considerarse como un tiempo medio para programar los trabajos o formular las especificaciones de un contrato. Pero lo ideal es que la duración del desarrollo se ajuste en cada caso a las condiciones particulares del pozo y a su efecto en la limpieza del agua. En algunos casos, la operación puede ser suspendida mucho antes de alcanzar el tiempo recomendado, mientras que en otros tiene que prolongarse mucho más para limpiar satisfactoriamente el pozo. En principio, el tiempo recomendado de desarrollo puede distribuirse uniformemente en la longitud a desarrollar, pero es recomendable concentrar la operación de limpieza en aquellos tramos donde se hayan registrado pérdidas de circulación del fluido.

Por muy enérgica que sea la acción del desarrollo, su impacto en las formaciones acuíferas está limitado a la vecindad inmediata del pozo. El fluido que haya penetrado varios metros o decenas de metros en las formaciones (se ha registrado invasión de lodo hasta distancias mayores que 100 m) solo puede ser removido a largo plazo por la operación normal del bombeo.

La limpieza puede darse por concluida cuando el agua salga libre de sólidos en suspensión y de lodo de perforación durante un tiempo razonable, en el entendido de que la operación normal del pozo durante los primeros días, continuará por sí misma la acción limpiadora. Sin embargo, es importante destacar que el desarrollo solo puede estabilizar las formaciones acuíferas cuando el filtro de grava y la abertura del cecazo hayan sido diseñados atendiendo a la granulometría de aquellas. Si estas características no son adecuadas, el pozo seguirá produciendo materiales finos por mucho que se prolonguen las operaciones de limpieza.

7.3. DESINFECCIÓN DE POZOS

La desinfección es el paso final en la terminación de un pozo. El objetivo fundamental es la destrucción total de los organismos productores de enfermedades que pudieron ser introducidos durante la perforación y el desarrollo del pozo. Sin embargo, la desinfección no solo se aplica a los pozos nuevos, también deben ser desinfectados aquellos aprovechamientos que hayan sido sujetos a mantenimiento.

El pozo de agua debe limpiarse lo más completamente posible de sustancias extrañas, como

tierra, grasa y aceite, antes de la desinfección. Este procedimiento consiste en la adición de una solución fuerte de cloro, hasta lograr una concentración de 50 mg/L, dejándola reposar por un periodo mínimo de 24 horas. Posteriormente se bombea el pozo para desalojar el agua. Para mayores especificaciones de este proceso referirse a la norma de la AWWA para desinfección de pozos (Norma ANSI/AWWA C654-87 *Desinfección de pozos*, 1987). Las sustancias de mayor empleo para la desinfección de los pozos son el hipoclorito de calcio y el hipoclorito de sodio.

La primera es la más empleada, debido a que contiene aproximadamente 70 por ciento de cloro disponible. Este se agrega hasta obtener una solución de concentración entre 50 y 200 ppm. Esta concentración se alcanza agregando 4 cucharadas soperas por cada 100 litros de agua. El hipoclorito de sodio se puede usar en ausencia del hipoclorito de calcio. Las concentraciones indicadas para este compuesto son de 1 litro por cada 100 de agua.

La desinfección se considera completa cuando el muestreo y el ensayo del agua revelan que no existe ninguna bacteria coliforme.



8

PRUEBAS DE AFORO

8.1. GENERALIDADES

Las pruebas experimentales y prácticas que se hacen en los pozos que son aprovechamientos hidráulicos son dos:

- Prueba de aforo
- Prueba de bombeo

Estas pruebas se llevan a cabo en el orden mencionado, aun cuando no necesariamente de manera consecutiva, ya que en algunos pozos solo se realiza la primera, esto sin duda debido a que la prueba de aforo es una operación que se debe realizar para determinar el caudal óptimo y niveles de operación de los pozos.

La segunda prueba se realiza solo con fines de investigación, cuando se requiere determinar las propiedades hidráulicas de los acuíferos. Cada una de las pruebas tiene una finalidad y de ellas pueden obtenerse datos acerca de las características hidráulicas de funcionamiento de los pozos y del acuífero que explotan.

Las pruebas de bombeo son las más complicadas de ejecutar, principalmente por los requerimientos técnicos y los materiales necesarios

para efectuarlas. Con una prueba de bombeo, también llamada prueba de acuífero, puede obtenerse información que permite determinar estas características:

- Transmisividad del acuífero
- Coeficiente de almacenamiento
- Características del acuífero (semiconfinamiento, recarga, drenaje diferido)
- Presencia y situación de límites (barreras impermeables, fallas, líneas de recarga, etc.)
- Geometría y características hidrodinámicas del sistema acuífero

Con una prueba de aforo, también denominada prueba de pozo, se puede obtener la siguiente información:

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

El objetivo que se busca con estas pruebas es conocer adecuadamente el funcionamiento de los pozos y del acuífero, con el fin de explotarlo adecuadamente. Esta explotación puede examinarse a partir del punto de vista general y del punto de vista particular.

8.1.1. GENERAL

Punto de vista a nivel regional, en el que interesa saber dónde y cuánta agua es posible extraer de un acuífero y cuáles son las consecuencias de esta explotación. Para lograr lo anterior, se emplean las pruebas de bombeo.

8.1.2. PARTICULAR

Interesa conocer las mejores condiciones de explotación de un pozo. Para ello, es necesaria información específica concerniente a su aprovechamiento, la que solo puede obtenerse mediante una prueba de aforo.

La prueba de aforo es la principal herramienta disponible para el estudio del comportamiento de los pozos, así como la predicción de caudales, tanto el crítico como el recomendable y para la obtención de valores preliminares representativos de las características de los acuíferos. Las pruebas de aforo permiten conocer las características de un pozo y parcialmente, el comportamiento hidráulico del acuífero en la zona inmediata al pozo; estas pruebas son un complemento a las pruebas de bombeo.

El objetivo esencial consiste en construir experimentalmente, mediante métodos gráficos, la curva característica de aprovechamiento. Aun cuando las pruebas de aforo no son costosas, requieren de una

correcta planificación para no cometer errores que después impidan una adecuada interpretación.

Para ejecutar un aforo se requiere de una bomba tipo turbina, accionada por un motor de combustión capaz de variar las revoluciones (r/min), una columna de longitud tal, que la bomba no succione aire al abatirse el nivel de agua, un dispositivo de medición de caudal y una sonda, preferentemente eléctrica.

8.2. MARCO TEÓRICO

Como decíamos, el objetivo esencial de las pruebas de aforo es la construcción experimental de las curvas características de los pozos que adoptan formas rectilíneas y parabólicas y que son la solución de la fórmula de Dupuit, para diferentes casos:

Esta fórmula o ecuación se basa en las siguientes hipótesis, las cuales se deben cumplir para el establecimiento teórico de flujo hacia los pozos.

- Establecimiento de un régimen del equilibrio del cono de abatimiento
- El agua y la roca son incompresibles
- Las superficies equipotenciales del flujo son planas, lo que significa que la velocidad horizontal del agua es constante en una misma vertical
- La ecuación de Darcy es válida, lo que significa que la velocidad es proporcional al gradiente hidráulico (Ecuación 8.4)
- La componente vertical de la velocidad es despreciable en comparación con la componente horizontal
- El medio es homogéneo e isotrópico
- El radio de influencia del pozo es constante en el tiempo

A continuación se describen los desarrollos teóricos de la ecuación de Darcy para obtener las curvas características.

$$Q \ln x = \pi K y^2 + cte \quad \text{Ecuación 8.4}$$

Sustituyendo x, y de la Ecuación 8.1, por r, R, h y H :

8.2.1. ACUÍFERO LIBRE

$$Q \ln r = \pi K h^2 + cte \quad \text{Ecuación 8.5}$$

Partiendo de la ecuación de Darcy se tiene lo siguiente:

$$Q \ln(R) = \pi K H^2 + cte \quad \text{Ecuación 8.6}$$

$$Q = K i S \quad \text{Ecuación 8.1}$$

donde:

Q = Caudal

K = Conductividad hidráulica

i = dy/dx (gradiente hidráulico)

S = $2\pi xy$ (superficie)

de lo que resulta:

Despejando e igualando las Ecuación 8.5 y Ecuación 8.6, resulta:

$$Q \ln(r) - \pi K h^2 = Q \ln(R) - \pi K H^2$$

$$\text{Ecuación 8.7}$$

Agrupando los términos similares:

$$Q = K \frac{dy}{dx} 2\pi xy \quad \text{Ecuación 8.2}$$

$$Q \ln\left(\frac{R}{r}\right) = \pi K (H^2 - h^2) \quad \text{Ecuación 8.8}$$

despejando:

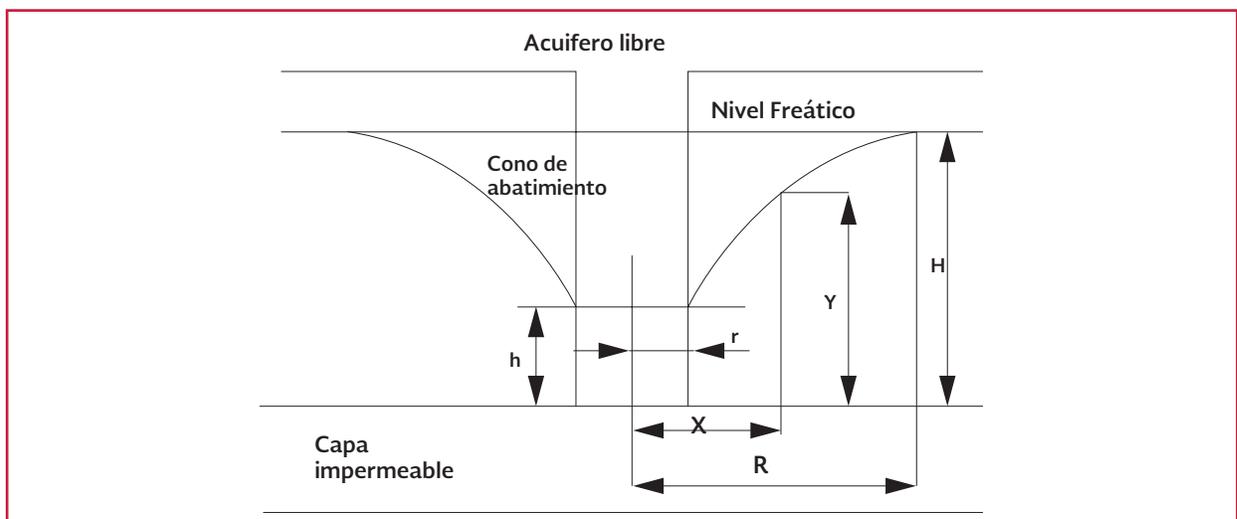
Despejando Q , se obtiene:

$$Q \frac{dx}{x} = K dy 2\pi y \quad \text{Ecuación 8.3}$$

$$Q = \pi K \frac{(H^2 - h^2)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad \text{Ecuación 8.9}$$

integrando:

Ilustración 8.1 Acuífero libre



en donde:

$$(H^2 - h^2) = (H - h)(H + h) \quad \text{Ecuación 8.10}$$

si $\Delta = H - h$; o sea $h = H - \Delta$

sustituyendo, resulta:

$$[H - (H - \Delta)][H + (H - \Delta)] = \Delta(2H - \Delta) \quad \text{Ecuación 8.11}$$

sustituyendo la Ecuación 8.11 en la Ecuación 8.9

$$Q = nK \frac{\Delta(2H - \Delta)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad \text{Ecuación 8.12}$$

si además se tiene que:

$$\frac{\pi K}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} = 1.366 \frac{K}{\log\left(\frac{R}{r}\right)} = C \quad \text{Ecuación 8.13}$$

al sustituir la Ecuación 8.13 en la Ecuación 8.12 resulta,

$$Q = C\Delta(2H - \Delta) \quad \text{Ecuación 8.14}$$

es decir

$$Q = -C\Delta^2 + C\Delta 2H \quad \text{Ecuación 8.15}$$

que es una ecuación cuya forma general es:

$$y = ax^2 - abx \quad \text{Ecuación 8.16}$$

que corresponde a una función parabólica de segundo grado, que puede ser resuelta por un método gráfico, al construir experimentalmente la curva característica caudal-abatimiento, con los datos obtenidos de las pruebas de aforo.

8.2.2. ACUÍFERO CONFINADO

Partiendo de la ecuación de Darcy:

$$Q = KiS \quad \text{Ecuación 8.17}$$

si:

$$i = dy/dx$$

$$S = 2\pi xe$$

e = Espesor del acuífero

se tiene que:

$$Q = K \frac{dy}{dx} 2\pi xe \quad \text{Ecuación 8.18}$$

despejando y resolviendo las integrales

$$Q \ln x = 2\pi Key + cte \quad \text{Ecuación 8.19}$$

sustituyendo las variables:

$$x = r, \quad y = h \quad \text{Ecuación 8.20}$$

$$x = R, \quad y = H \quad \text{Ecuación 8.21}$$

de acuerdo a la Ilustración 8.2, se obtiene:

$$Q \ln r = 2\pi Keh + cte \quad \text{Ecuación 8.22}$$

$$Q \ln R = 2\pi KeH + cte \quad \text{Ecuación 8.23}$$

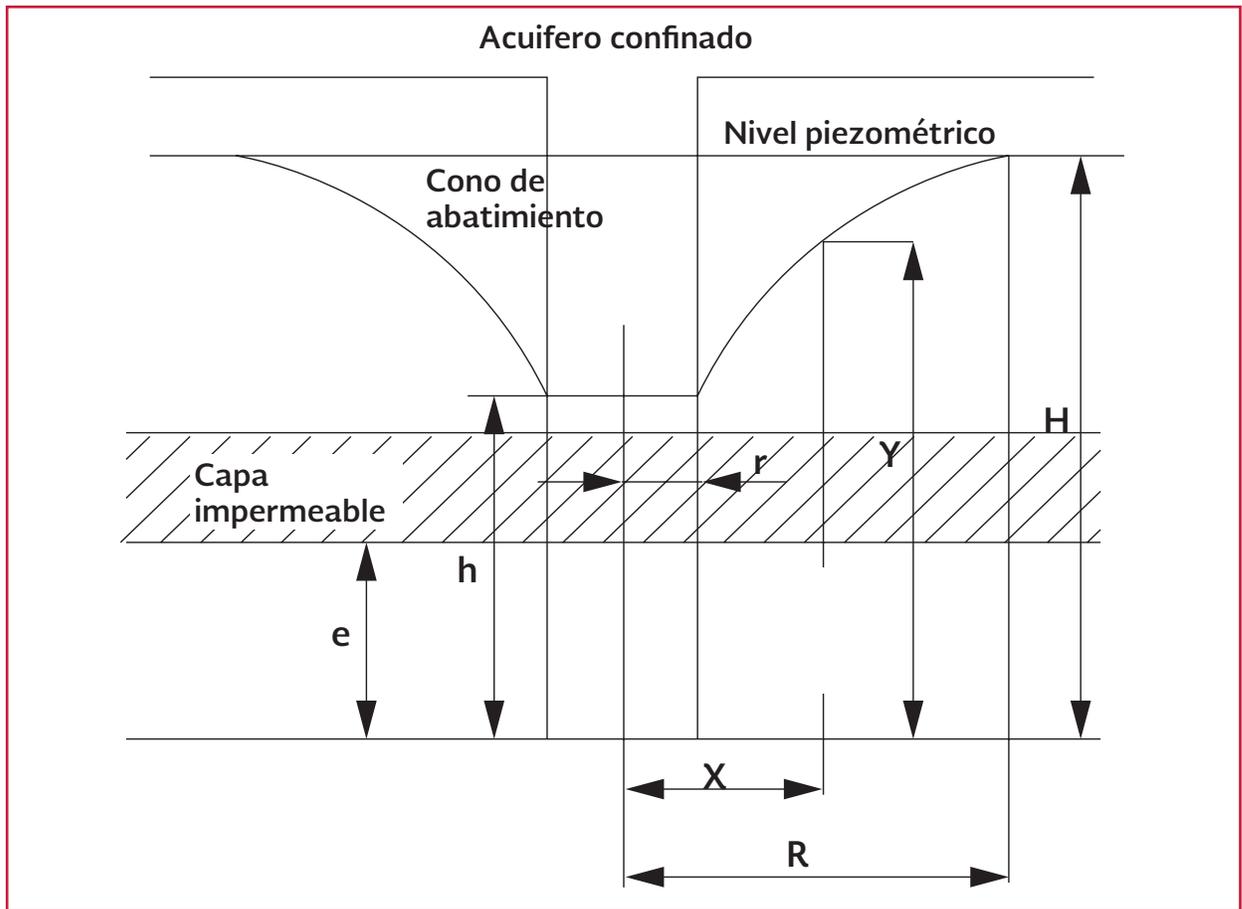
despejando e igualando Ecuación 8.22 y Ecuación 8.23,

$$Q \ln r - 2\pi Keh = Q \ln R - 2\pi KeH \quad \text{Ecuación 8.24}$$

agrupando en términos similares y despejando:

$$Q \ln\left(\frac{R}{r}\right) = 2\pi Ke(H - h) \quad \text{Ecuación 8.25}$$

Ilustración 8.2 Acuífero confinado



despejando Q :

$$Q = 2\pi Ke \frac{H-h}{\ln \frac{R}{r}} \quad \text{Ecuación 8.26}$$

si:

$$C = \frac{2\pi Ke}{\ln \frac{R}{r}}$$

$$\Delta = H - h$$

al sustituir en la Ecuación 8.26,

$$Q = C\Delta \quad \text{Ecuación 8.27}$$

que es una ecuación que corresponde a una recta cuya pendiente es:

$$C = 2.73 \frac{Ke}{\log \frac{R}{r}} \quad \text{Ecuación 8.28}$$

y que puede obtenerse de manera experimental al graficar los datos obtenidos en la prueba de aforo, para los primeros escalones, ya que para abatimientos más fuertes, el comportamiento es complejo. Bajo estas circunstancias, la ecuación de Dupuit no es válida, dado que el abatimiento es superior a 25 por ciento de la altura piezométrica ($H - e$). Para abatimientos importantes, la ecuación de la curva de depresión es del tipo:

$$H - h = \left[\frac{Q}{2\pi ke} \right] \ln \left(\frac{R}{r} \right) + BQ^n \quad \text{Ecuación 8.29}$$

que corresponde a la fórmula de Jacob

si $\Delta = H - h$ y

$$C = \frac{\ln \frac{R}{r}}{2\pi Ke} \quad \text{Ecuación 8.30}$$

se tiene:

$$\Delta = CQ + BQ^n \quad \text{Ecuación 8.31}$$

donde:

CQ = Pérdidas de carga en el acuífero

BQ^n = Pérdidas de carga en el pozo

Si se considera que para Jacob $n = 2$, al sustituir en la Ecuación 8.31 se tiene:

$$\Delta = CQ + BQ^2 \quad \text{Ecuación 8.32}$$

Esta fórmula corresponde a una parabólica, cuya solución es posible obtener al graficar los datos abatimiento-caudal, obtenidos de manera experimental en la prueba de aforo para caudales o escalones importantes en acuíferos confinados.

8.3. REQUISITOS PARA REALIZAR LAS PRUEBAS DE AFORO

Cuando se realiza una prueba de aforo para determinar las características del aprovechamiento, es preciso que el lugar cumpla con las siguientes condiciones o requisitos que facilitarán, no sólo la ejecución de la prueba, sino también la obtención de la interpretación de los datos que permitan evaluar los parámetros.

8.3.1. HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

- Que el acuífero sea lo más homogéneo posible y responda a un modelo sencillo (libre, confinado, etcétera)
- Que no existan bombes próximos u otras actividades que provoquen variaciones en el nivel del agua subterránea
- Que el agua bombeada no vuelva al acuífero
- Si el acuífero es libre, que el nivel freático sea lo suficientemente profundo como para no tener efectos por evapotranspiración

8.3.2. RECURSOS ECONÓMICOS

- Que el pozo pueda ser probado durante un periodo de tiempo prolongado
- Que se facilite y sea barata la eliminación del agua bombeada, sin crear problemas a terceros
- Que en caso de pagar indemnizaciones por uso de pozo, afectaciones a cultivos o instalaciones, etc., sean menores
- Que el equipo de bombeo sea el adecuado, a fin de evitar la repetición de la prueba por falta de confiabilidad de los datos obtenidos con un equipo de bombeo de baja potencia

8.3.3. OPERACIÓN DEL EQUIPO

- Que el pozo haya sido desarrollado correctamente con anterioridad y que esté limpio, sin sedimentos en el fondo

- Que existan facilidades para medir el caudal extraído del pozo
- Que sea fácil instalar la tubería o el canal de desagüe, o que la tubería existente desaloje el agua lo suficientemente lejos para evitar la recarga, principalmente cuando se trata de acuíferos libres
- Que sea fácil medir el nivel del agua en el pozo, sin obstrucciones

Para efectuar las pruebas se deben emplear bombas que permitan variar el caudal de extracción. Las bombas impulsadas por motores de combustión interna son las más utilizadas, en especial las de acopio directo. No obstante, en ocasiones sufren derivas en el número de revoluciones, debido principalmente a cambios en las condiciones externas. Por ello se debe vigilar que haya facilidades para su instalación.

Pocas veces se cumplen todas las condiciones anteriores. En la realidad, la ejecución de la prueba está determinada por el cumplimiento de la mayoría de ellas, y en especial, si se cuenta con los recursos económicos que permitan su realización.

8.4. EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS

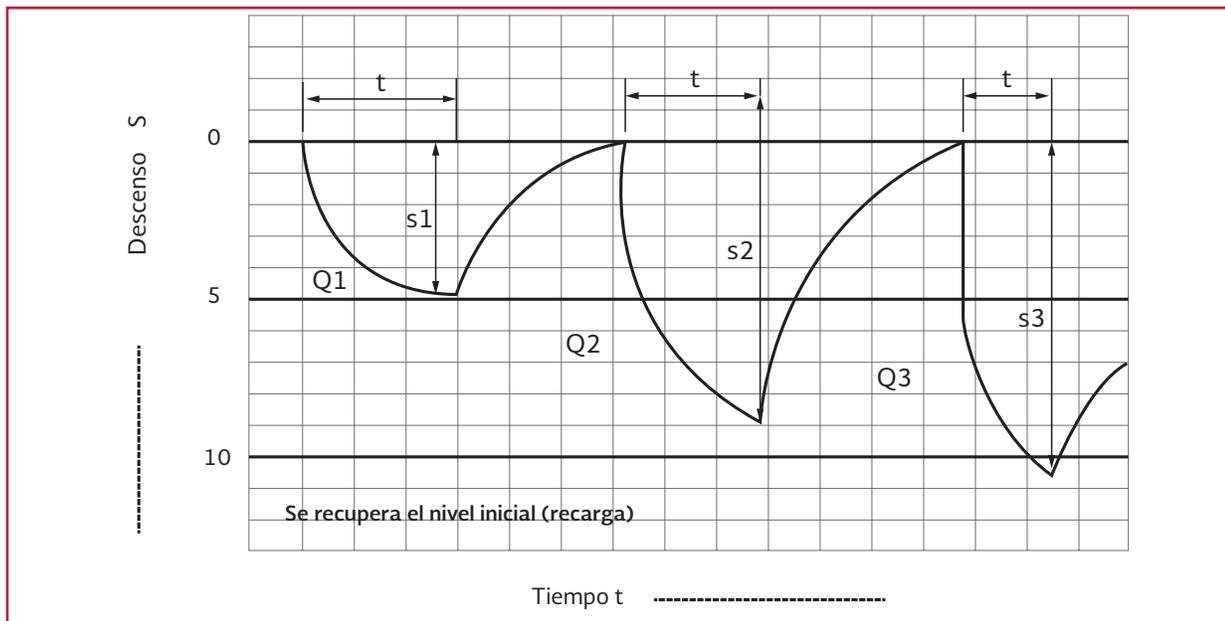
En general se consideran dos tipos de pruebas de aforo. La prueba de aforo a caudal escalonado discontinuo y la prueba de aforo a caudal escalonado continuo. Cada una se aplica de acuerdo a las condiciones que prevalecen en cada pozo. Si durante el desarrollo de un pozo se registró que el tiempo de recuperación del nivel estático del agua subterránea es del mismo orden que el tiempo de bombeo, la prueba a aplicar es discontinua. En caso que esta recuperación sea de un orden mayor, entonces se efectúa una prueba escalonada continua.

8.4.1. PRUEBA DE AFORO A CAUDAL ESCALONADO DISCONTINUO

Los pasos a seguir para llevar a cabo esta prueba son los siguientes:

- Con los datos obtenidos durante el desarrollo del pozo se determina el caudal mínimo posible (Q_{\min}) de acuerdo a la capacidad de la bomba y al caudal máximo (Q_{\max}). Se establecen cuando menos cuatro caudales de prueba distintos, tan diferentes como sea posible, dentro del ámbito $Q_{\min} - Q_{\max}$. Conviene que los caudales o escalones no sean muy próximos, ni tampoco muy separados. La distribución de caudales en progresión geométrica es una buena práctica. Es conveniente establecerlos de forma que el último escalón se ubique cercano al caudal máximo alcanzado en la etapa de desarrollo o incluso por encima de este
- Los caudales, a pesar de ser crecientes de manera escalonada, son constantes en cada intervalo de tiempo. Antes de iniciar un nuevo escalón se debe permitir que el nivel estático del agua se recupere por lo menos 90 por ciento. En ocasiones no es necesario que la duración de los escalones sea igual en tiempo, debido a que la estabilidad se puede lograr en momentos diferentes para caudales distintos. Este tipo de prueba es muy larga por las esperas en la recuperación (Ilustración 8.3)
- Se tabulan los valores del caudal (Q), del abatimiento (s) y del caudal específico (Q/s), correspondientes a cada uno de los escalones de prueba, obtenidos de graficar las lecturas de abatimiento del nivel

Ilustración 8.3 Gráfica de una prueba de aforo a caudal escalonado discontinuo



del agua y del caudal de extracción. Con los valores representativos de los escalones de prueba, se elaboran la gráfica caudal contra abatimiento y la de caudal específico contra abatimiento; ambas se realizan en el campo

- Se identifican las posibles anomalías que hayan surgido durante la ejecución de la prueba, de acuerdo al comportamiento de las curvas graficadas. Se determina el origen en la variación, las posibles fuentes de error o el desarrollo de pozo defectuoso
- Se determina el caudal crítico del pozo (Q_c) por inspección de la curva caudal contra abatimiento, de acuerdo a la localización del punto de máxima curvatura de la gráfica (principalmente para acuíferos libres)
- Se ubica el caudal recomendable del pozo (Q_r), entre el 75 y 80 por ciento del caudal crítico obtenido

8.4.2. PRUEBA DE AFORO A CAUDAL ESCALONADO CONTINUO

Esta prueba es más rápida en su ejecución en comparación con la anterior, debido a que al transcurrir cada periodo de observación, el bombeo no se suspende en espera de que el nivel estático se recupere, sino que se incrementa el caudal de bombeo al escalón siguiente.

Los pasos generales en este tipo de prueba son los siguientes:

- Se determina el gasto mínimo y máximo a partir de la capacidad de la bomba, de la respuesta del acuífero y de los valores aplicados durante el desarrollo del pozo. Al igual que en la prueba anterior, se establecen cuando menos cuatro caudales de prueba dentro del intervalo Q_{min} - Q_{max} . Los caudales deben establecerse a intervalos bien diferenciados, quedando

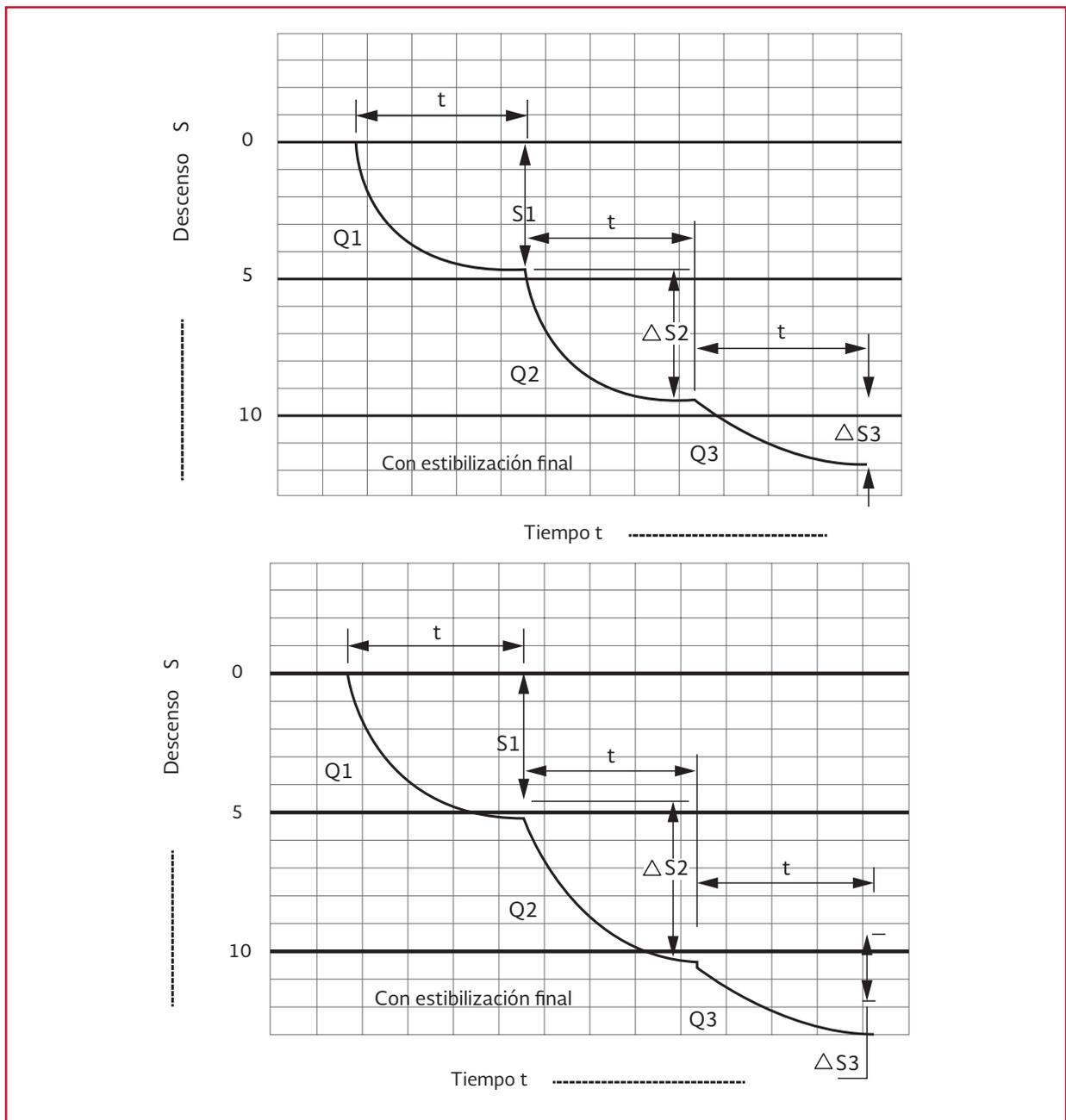
el último escalón alrededor del caudal máximo alcanzado en la etapa de desarrollo, o incluso por encima de este

- Cada uno de los caudales seleccionados se aplica de manera constante hasta que el nivel M del acuífero se estabilice. Posteriormente se incrementa al segundo caudal, hasta que el nivel dinámico vuelva a estabilizarse y así sucesivamente,

hasta cubrir los caudales o los escalones predeterminados. Se recomienda probar con tantos caudales distintos como sea posible, considerando que deben estar bien diferenciados (Ilustración 8.4)

- Se tabulan los valores de caudal (Q), de abatimiento (s) y de caudal específico (Q/s), de cada uno de los escalones probados y son datos de las gráficas elaboradas

Ilustración 8.4 Gráfica de una prueba de aforo a caudal escalonado continuo



radas para cada escalón, tomadas de las lecturas de abatimiento, del nivel del agua y del caudal de extracción. Con los valores representativos de cada escalón de prueba (Q , s y Q/s), se elabora la gráfica caudal contra abatimiento y caudal específico contra abatimiento. La elaboración de estas gráficas se realiza en el sitio de la prueba

- Se identifican las posibles anomalías surgidas durante la ejecución de la prueba, por la inspección de las gráficas, estableciendo las fuentes de error
- Se obtiene el caudal crítico del pozo (Q_c) por inspección de la gráfica caudal contra abatimiento, localizado en el punto

de máxima curvatura de la gráfica (principalmente en acuíferos libres)

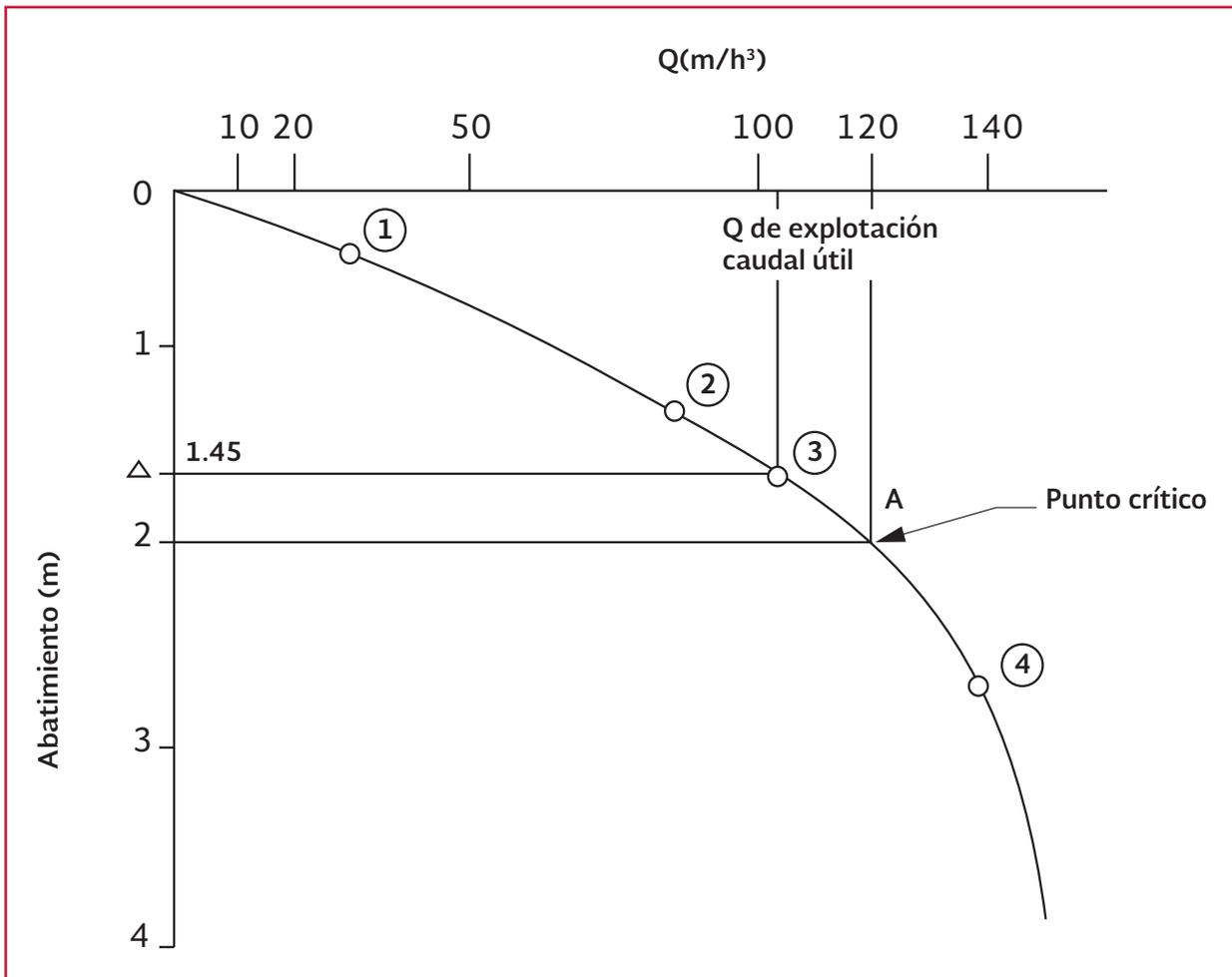
- Se ubica el caudal recomendable (Q_r), entre el 75 y el 80 por ciento del caudal crítico obtenido (Ilustración 8.5)

8.5. CONSIDERACIONES EN LAS PRUEBAS DE AFORO

8.5.1. DURACIÓN DE LAS PRUEBAS

La duración de una prueba de aforo está en relación directa con el tiempo en que se realizan las mediciones, tanto de caudal como de niveles de agua.

Ilustración 8.5 Ubicación del caudal útil y punto crítico



Las mediciones simultáneas de caudales y de niveles de agua para cada escalón deben efectuarse con la mayor precisión, ya que de su exactitud depende la consistencia de los resultados obtenidos. Estas lecturas, principalmente las del nivel de agua, deben efectuarse de manera continua al inicio de cada escalón, espaciándose conforme transcurre el tiempo. Una propuesta para efectuar las lecturas en cada escalón, se presenta en la Tabla 8.1.

No es necesario que para cada caudal propuesto el tiempo de duración se prolongue hasta las 12 horas. Este tiempo es variable y debe suspenderse una vez que se ha alcanzado la estabilización en el nivel del agua, es decir, cuando el dato muestre mínima variación.

En los acuíferos confinados y especialmente en los semiconfinados, la estabilización puede conseguirse en unas pocas horas. Pero en los acuíferos libres puede tardarse muchas horas e incluso más de un día. En cualquier caso, la estabilización es difícil de lograr y solo queda clara al momento de graficar de forma semilogarítmica los datos obtenidos.

La duración de la prueba depende en gran parte de las características hidrogeológicas del acuífero. En ocasiones, con 12 horas de bombeo es suficiente para obtener la curva característica y alcanzar los objetivos de la prueba. Sin embargo, se dan casos en los que la duración de una prue-

ba de aforo suele prolongarse de manera global de 24 a un máximo de 72 horas.

Si durante la prueba de aforo se presenta una interrupción de duración importante comparada con el tiempo que se lleva bombeando, por ejemplo por encima de un 5 por ciento, conviene detener la prueba y reiniciarla después de transcurrido un lapso de tiempo por lo menos igual al que se ha bombeado y aún mejor, si se puede, que sea del doble del tiempo de bombeo. En cualquier caso, conviene comprobar si se ha recuperado el nivel inicial.

El registro de las lecturas es una parte importante en la realización de las pruebas de aforo así como la representación de las observaciones adicionales. En ellas, deben anotarse todas las incidencias que sean de interés, por ejemplo, los cambios de personal, los cambios de aparato de medición, las averías, los incidentes en la medición, los ajustes de caudal, los paros, etcétera.

Es importante que los datos se registren con cuidado y con pulcritud, lo que en ocasiones es difícil de cumplir cuando hay incomodidades diversas en el sitio, cuando las inclemencias del tiempo afectan el trabajo o cuando se registran tiempos prolongados de trabajo. No obstante, conviene registrar cuidadosamente los datos para evitar repeticiones costosas tanto en dinero como en tiempo.

Tabla 8.1 Tiempos de lectura para pruebas de aforo

| Periodicidad de lecturas | Intervalo de tiempo |
|--------------------------|---------------------|
| Cada 15 segundos | 0 – 1 min |
| Cada 30 segundos | 1 min - 5 min |
| Cada 60 segundos | 5 min - 10 min |
| Cada 5 minutos | 10 min - 30 min |
| Cada 10 minutos | 30 min - 60 min |
| Cada 30 minutos | 1 h- 6 h |
| Cada 60 minutos | 6 h- 12 h |

8.5.2. MEDICIÓN DEL CAUDAL DE AFORO

En las pruebas de aforo se debe disponer de un sistema que permita medir el caudal bombeado y apreciar sus variaciones. En general, son preferibles los sistemas continuos de medición del caudal. Los mejores son los vertedores rectangulares, cuando se desean medir caudales grandes, y los vertedores triangulares cuando los caudales son pequeños. Hay vertedores portátiles que pueden ser instalados en el lugar que se necesite.

Un sistema de medición discontinuo, que quizá sea el más utilizado por ser muy práctico, es el basado en el tiempo de llenado de un recipiente de capacidad conocida. El recipiente debe tardarse en llenar más de 10 segundos, a fin de tener precisión en las mediciones. Para caudales de 2 L/s se pueden emplear recipientes de 20 a 30 litros y para caudales de hasta 10 L/s se pueden emplear recipientes de 200 litros. Para caudales mayores, pueden emplearse depósitos de mayor capacidad. Algunas consideraciones de importancia son las siguientes:

- El recipiente debe ser de volumen conocido y encontrarse en buen estado de conservación. El empleo de bidones abollados lleva inherente un error en el volumen
- La tubería de conducción del agua debe ser giratoria a fin de ponerla sobre el recipiente y quitarla con rapidez. No se recomienda el uso de mangueras ascendentes, ya que la variación de elevaciones puede afectar el caudal de bombeo
- Se debe poder vaciar el recipiente fácil y rápidamente y sin producir derrames de agua

El sistema de medición discontinuo por llenado de un depósito de volumen conocido es a veces molesto de operar, pero con él se puede alcanzar buena precisión.

Otros métodos para la medición de caudales de pocas decenas de L/s son los aforadores de tipo circular, los basados en la parábola de salida del agua de un tubo horizontal, los basados en la altura de ascensión del chorro de agua sobre el borde de una tubería vertical y los contadores totales.

El buen conocimiento que se tenga del caudal bombeado y mantenerlo constante durante el período de prueba, es tan importante como la precisión en la medida de los niveles de agua.

8.5.3. MEDICIÓN DEL NIVEL DE AGUA

Para la medición de los niveles de agua subterránea deben emplearse dispositivos que permitan medir los niveles con un margen de error menor a 1 cm y en ocasiones menor a 0.2 cm. Los dispositivos recomendados de medición de niveles son los que permiten medir con precisión y rapidez los descensos de nivel.

Entre los dispositivos manuales, los más cómodos son las sondas (medidores) eléctricas, tanto de un hilo como de dos. Los medidores por golpeteo sobre la superficie del agua pueden ser

útiles si la persona que los maneja es hábil; sin embargo no son útiles en los pozos aforados, debido al ruido provocado por la bomba.

8.6. CURVA CARACTERÍSTICA DEL POZO

Uno de los resultados fundamentales de las pruebas de aforo, son los datos que permiten elaborar la curva característica del aprovechamiento.

Esta curva se obtiene de la relación gráfica existente entre el caudal y el descenso medido en el nivel del agua subterránea en el pozo de prueba. También reciben este nombre las relaciones gráficas entre los caudales específicos y el abatimiento, para cada uno de ellos.

Se trata de curvas que caracterizan una captación determinada, siempre y cuando los niveles regionales de agua subterránea o el coeficiente de almacenamiento no sufran variaciones importantes.

Las averías y el envejecimiento de los aprovechamientos por corrosión, incrustación, etc., suponen variaciones en la curva característica y pueden servir para indicar la necesidad de efectuar reparaciones o mantenimiento preventivo.

8.6.1. TIPOS DE ACUÍFEROS Y CURVAS CARACTERÍSTICAS

Si el acuífero es confinado o semiconfinado, el caudal es directamente proporcional al abatimiento producido. Esto sucede principalmente en los primeros escalones y para caudales y des-

censos pequeños. De esta forma la curva característica caudal en función del abatimiento del nivel de agua subterránea, es una recta que pasa por el origen, tal y como se expresó en el apartado 8.2.2, en donde se obtuvo la ecuación representativa de esta recta, mientras que la curva caudal específico en función del abatimiento es una recta paralela al eje de abatimiento (Ilustración 8.6). Sin embargo, para descensos importantes sucedidos bajo caudales mayores, la gráfica caudal en función del abatimiento, obedece a una ley compleja cuyo resultado es una curva parabólica.

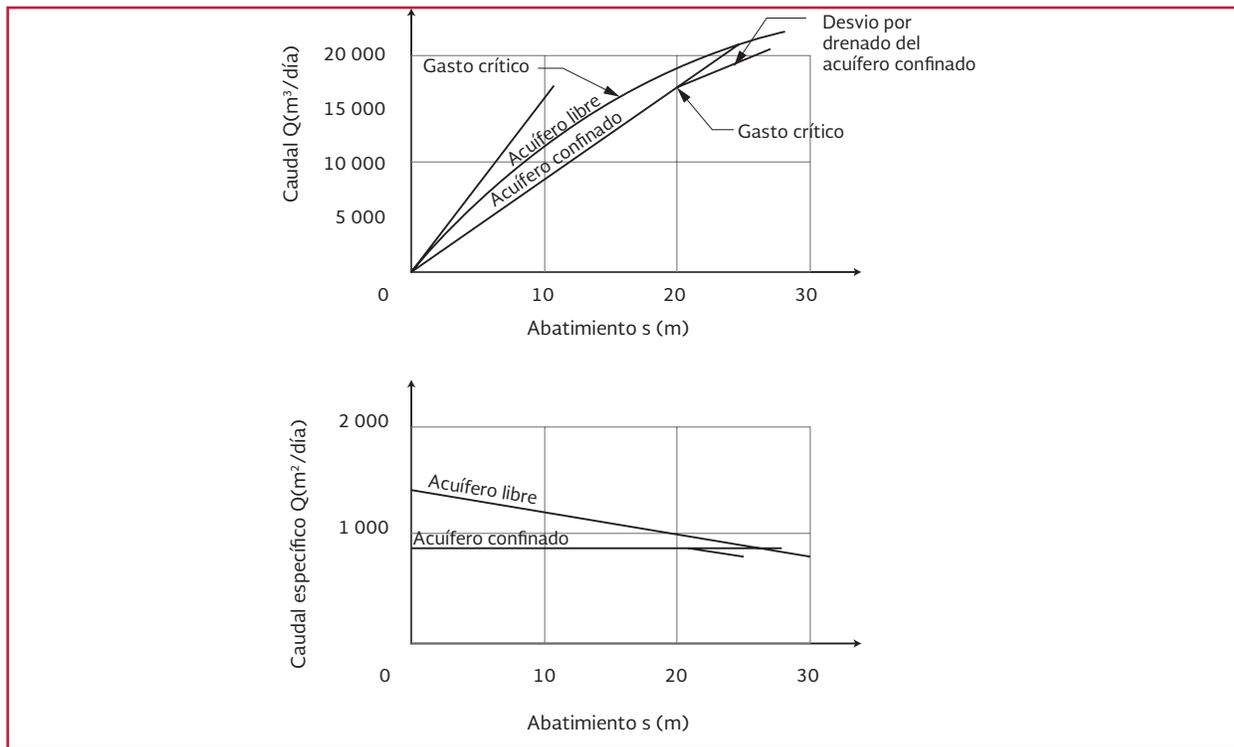
Si el acuífero es libre, el abatimiento del nivel ocasiona una disminución de su transmisividad y por lo tanto el ritmo del descenso, es mayor que el del caudal. El comportamiento de esta curva, corresponde a una parábola de segundo grado que pasa por el origen, de eje paralelo al eje de caudales (Ilustración 8.6). Esta curva es la solución gráfica a la ecuación desarrollada en el apartado 8.2.1, que corresponde a su forma general.

Aunque la inspección visual de las curvas características proporciona una importante y rápida información de las características de los pozos, es preciso obrar con prudencia al momento de interpretadas.

La interpretación de los datos de una prueba de aforo y por ende de una curva característica, debe ser hecha por un especialista con suficientes conocimientos de hidráulica subterránea, que conozca la estructura geológica del acuífero y los detalles del ensayo.

Una interpretación realizada con base en una serie de recetas o por una persona con escasos

Ilustración 8.6 Curvas características de acuíferos libre y confinado



conocimientos, o que no preste atención a las peculiaridades y aparentes anomalías, puede conducir a valoraciones poco realistas.

8.6.2. ANOMALÍAS EN LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

Algunas veces la forma y las condiciones de las curvas características son diferentes de las establecidas. Los errores en la obtención de niveles o de caudales, la medida de niveles ficticios o el cambio de las características del acuífero durante el ensayo (cambio del nivel inicial, bombeo de un pozo próximo, cambio del coeficiente de almacenamiento por asentamiento, desarrollo del pozo o colmatación, etc.), pueden deformar notablemente las curvas características, haciendo falsa su interpretación (Ilustración 8.7).

Un tipo de anomalía muy común es el comportamiento lineal observado en los primeros ins-

tantes de la gráfica caudal abatimiento, que cambia súbitamente a parabólica. Este cambio en el comportamiento se debe a la variación que se da en el régimen de flujo del agua hacia el pozo, que es laminar al principio y turbulento después cuando se incrementa el caudal (Ilustración 8.8).

Al final de la prueba es recomendable confirmar alguno de los datos obtenidos para asegurar que se reproduzcan.

Para trazar la curva no conviene tomar datos de períodos de prueba diferentes, ya que pueden presentarse variaciones en las condiciones del pozo o del acuífero entre uno y otro.

8.7. RECOMENDACIONES

No existe una regla específica que se aplique a todas las pruebas de aforo. Cada prueba se lleva a cabo bajo condiciones particulares que rara

Ilustración 8.7 Curvas características: a) acuífero confinado, b) libre, c) con pérdidas y d) datos mal tomados

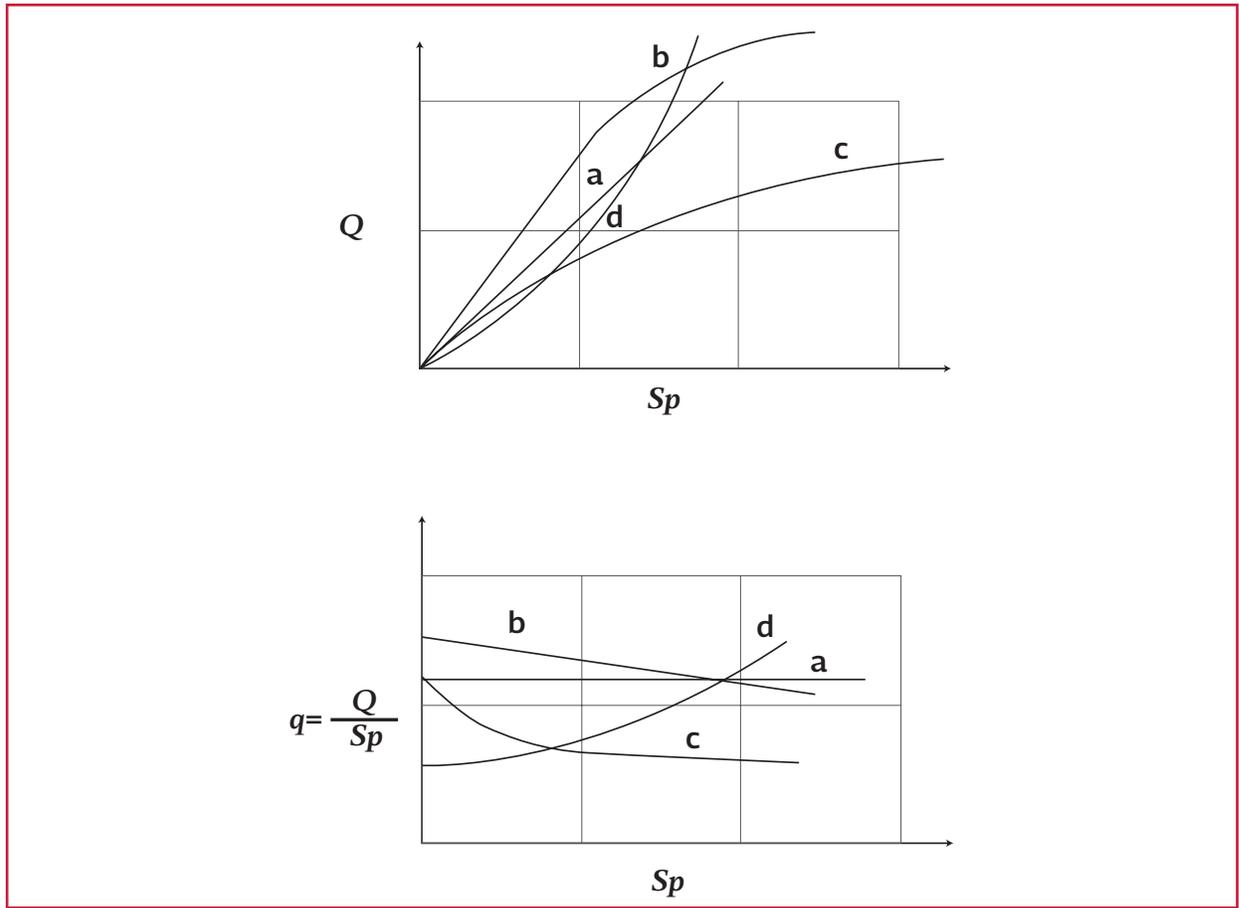
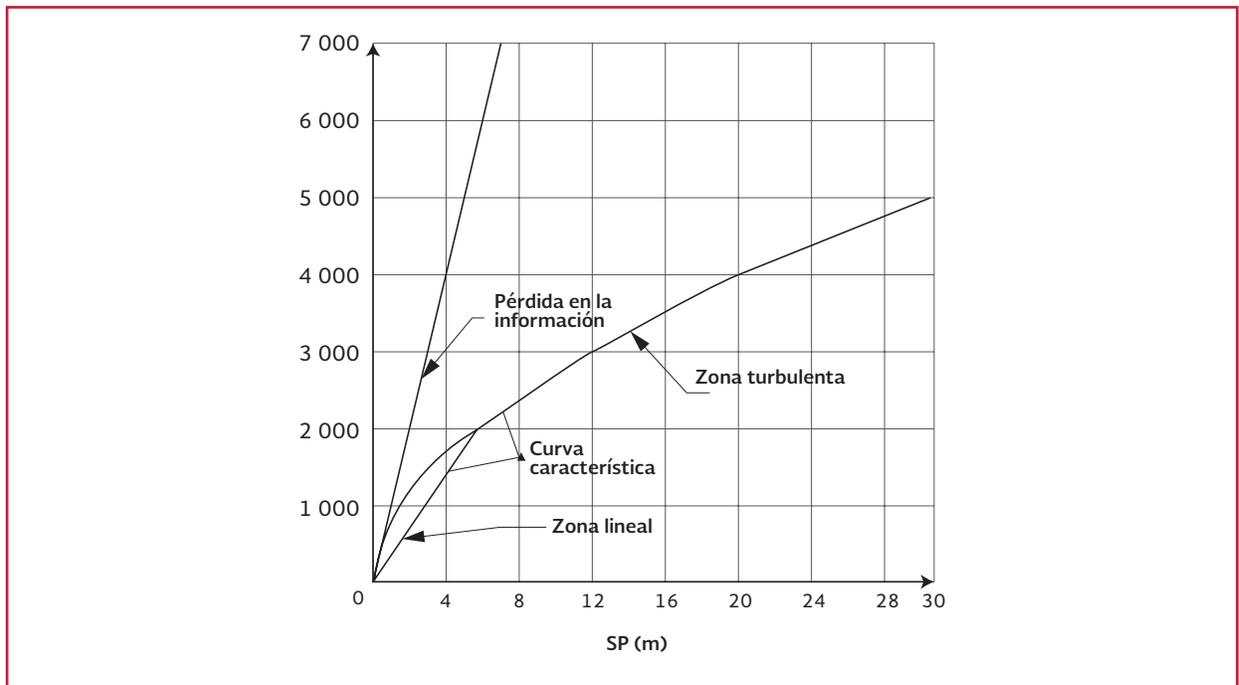


Ilustración 8.8 Anomalía en la curva característica



vez pueden repetirse pues se realizan en condiciones de espacio y de tiempo diferentes.

Un programa de pruebas de aforo así como su interpretación, deben adaptarse a la información obtenida y ser dirigidos para conocer las características de los pozos.

Un programa de prueba de aforo debe comprender como mínimo los siguientes elementos:

- Pozo de prueba (conocimiento de las características constructivas y geológicas)
- Caudales bajo los cuales se llevará a cabo la prueba.
- Temporada de prueba (estiaje o lluvia)
- Duración global aproximada
- Dispositivos de medición

Debido al elevado costo de las pruebas de acuífero (prueba de bombeo), las pruebas de pozo (pruebas de aforo) son empleadas para simular las características hidráulicas de los acuíferos; sin embargo, esto puede generar errores considerables.

La duración de una prueba de aforo es difícil de preestablecer, ya que depende del tipo de acuífero y de la exactitud con la que se desee obtener los resultados. El economizar tiempo

no es aconsejable, debido al elevado costo de la prueba total, en comparación con el bajo costo de las horas extras.

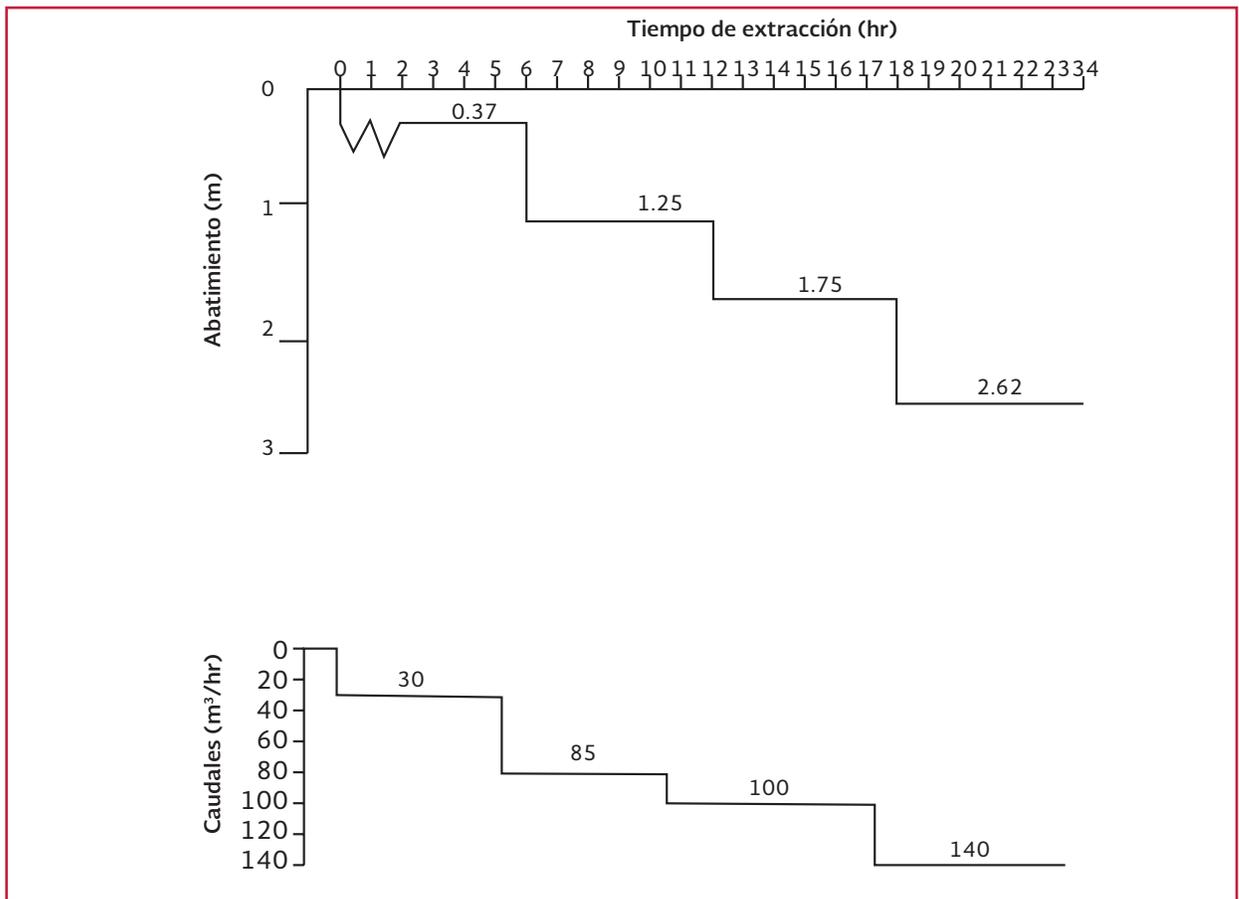
Al graficar *in situ* los valores que se van obteniendo en el desarrollo de la prueba, se pueden apreciar su evolución y su comportamiento. La gráfica también arroja información para determinar la duración de la prueba y de la posible aparición de errores (Ilustración 8.9).

Las mediciones, tanto de caudal como de nivel del agua subterránea, deben hacerse de la manera más exacta posible.

La validez de los resultados y la interpretación de los mismos, no aumenta necesariamente en proporción a la duración de la prueba, sino de su óptimo desarrollo. Se debe tener cuidado de que el agua extraída durante el aforo no se infiltre en las cercanías del pozo para que no recargue el acuífero en explotación.

Por comodidad y para que todas las mediciones estén referidas al momento del arranque efectivo de la bomba, conviene usar cronómetros que se accionen a una señal dada en el instante que inicia la prueba, o bien sincronizar relojes para iniciar el bombeo de manera coordinada.

Ilustración 8.9 Gráfica de prueba de aforo





9

EQUIPAMIENTO E INSTRUMENTACIÓN

9.1. EQUIPO DE BOMBEO

La función principal de una bomba es la de impartir energía hidráulica a un volumen de agua, originando de esta manera un flujo de corriente o movimiento. Las bombas se emplean para elevar el agua de su nivel de almacenamiento (en el subsuelo), hasta la superficie del terreno, o simplemente para mover un fluido a través de un conducto de un lugar a otro.

Las bombas se clasifican en dos grupos, de acuerdo a los principios mecánicos que se emplean en su funcionamiento:

Bombas de desplazamiento constante

- De émbolo o de pistón
- Rotatorias
- Rotor helicoidal

Bombas de desplazamiento variable

- Bombas centrífugas
 - De succión elevada
 - De turbina
 - De turbina sumergible
- Bombas de chorro

9.1.1. BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO CONSTANTE

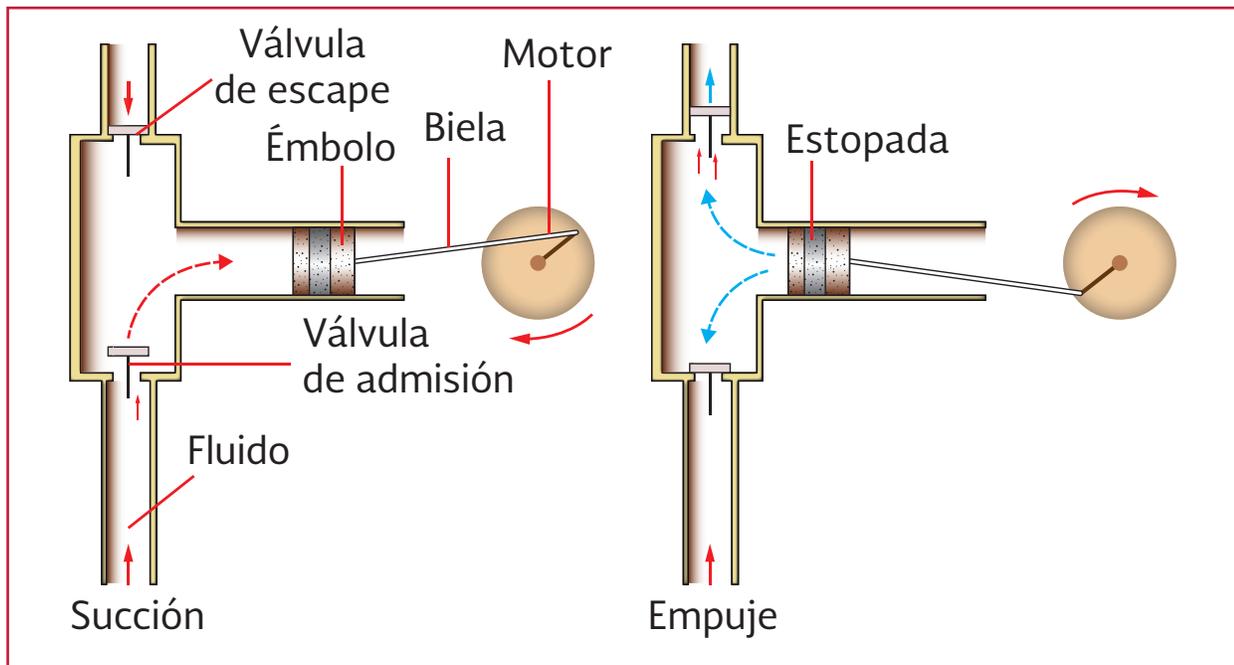
Este tipo de bombas suministran esencialmente la misma cantidad de agua contra cualquier carga que esté dentro de su capacidad de funcionamiento. En la práctica, esto no es estrictamente cierto, principalmente por las pérdidas que se producen en las partes móviles. Se emplean en pozos someros, domésticos y de monitoreo. A continuación se describen brevemente las bombas de émbolo, por ser las de mayor uso.

En la Tabla 9.3 se puede consultar información acerca de otros tipos de bombas de desplazamiento constante.

9.1.1.1. Bombas de émbolo o de pistón

Su funcionamiento se basa en la acción de uno o más pistones que provocan presiones diferenciales por debajo de los émbolos y ocasionan un movimiento ascendente del fluido. Estas bombas se clasifican en dos tipos: de superficie y de pozo profundo. La primera se acciona manualmente y la segunda mecánicamente (Ilustración 9.1).

Ilustración 9.1 Bomba de émbolo o de pistón



Durante varios años se utilizó este tipo de bomba en los pozos de agua y fue desplazado por las bombas centrífugas verticales.

9.1.1.2. Ventajas de las bombas de émbolo

- Su costo inicial es reducido
- Son de fácil mantenimiento
- La descarga es constante bajo presiones variables
- Flexible en su uso para satisfacer demandas variables
- Bombea agua que contiene arena y limos

9.1.1.3. Desventajas de las bombas de émbolo

- La velocidad de descarga es variable, de acuerdo a la velocidad de movimiento del émbolo
- Está sujeta a vibración y ruido
- Ocasiona presiones destructoras si funciona con válvula cerrada

9.1.2. BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO VARIABLE

Estas bombas se distinguen por la relación inversa que existe entre el caudal que pueden suministrar y la carga contra la cual se realiza el bombeo, es decir, el régimen de bombeo disminuye al aumentar la carga de presión. Actualmente son las más utilizadas en pozos profundos.

Los principales tipos de bombas de desplazamiento variable se describen a continuación.

9.1.2.1. Bombas centrífugas

Son las más importantes de este grupo, de hecho, se usan más ampliamente que cualquier otro tipo de bomba.

Los principios fundamentales de su funcionamiento se descubrieron y demostraron experi-

mentalmente hace 300 años. Sin embargo fue hasta el siglo XIX que se desarrolló tecnológicamente. La bomba centrífuga es una máquina de alta velocidad capaz de descargar agua en grandes cantidades y con alta eficiencia. Su funcionamiento se basa en la aplicación de una fuerza centrífuga al agua, en la cámara de bombeo. Este tipo de bomba tiene las siguientes características:

- Se adapta a diferentes sistemas de transmisión
- Provocan un flujo suave y uniforme
- Tienen bajo par de torsión de arranque y alta eficiencia

De acuerdo a su diseño, las bombas centrífugas pueden ser de succión elevada, de turbina vertical y sumergible. Las dos últimas son las más comunes en el equipamiento de pozos

9.1.2.2. Bombas de turbina vertical

Este tipo de bomba es una variante de las centrífugas. Pueden ser de paso sencillo o de paso múltiple y estar lubricadas por agua (Ilustración 9.2) o por aceite (Ilustración 9.3).

En el bombeo de agua potable se utilizan las bombas lubricadas por agua por su mayor limpieza en la operación. Sin embargo, en pozos donde se tiene mucha arena, no es posible usarlas debido a la agresión que la arena ofrece a las flechas de transmisión, a los estabilizadores y a los tazones de la bomba. Es por eso que en estos casos se emplea la bomba lubricada por aceite, sacrificando la pureza del agua y utilizando algún método de separación de aceite.

Los motores que se emplean con mayor frecuencia para este tipo de bomba, vertical y de flecha hueca, se encuentran disponibles en potencias que oscilan de 15 a 350 caballos de fuerza. Algunos datos técnicos para este tipo de motores se observan en la Tabla 9.1. En la Ilustración 9.2 se muestran sus dimensiones generales.

Algunas de las características importantes de las bombas de turbina vertical son:

- Trabaja con impulsores sumergibles
- La profundidad usual de bombeo es mayor a 7.6 m (25 pies)
- La carga usual de presión oscila entre 30.5 y 244 metros de agua
- Su motor opera generalmente entre 1740 y 1785 r/min

Ventajas de la bomba de turbina vertical

- Genera un flujo suave y uniforme
- Puede bombear agua que contenga arena y limo
- La presión en el sistema es uniforme y exenta de choques
- Tiene bajo par de torsión de arranque
- Es confiable, proporciona buen servicio
- El motor no es susceptible al fallo de la corriente eléctrica

Desventajas de la bomba de turbina vertical

- Para un buen funcionamiento se requiere que trabaje bajo cargas y velocidades de diseño
- Requiere del suficiente alineamiento y de la verticalidad del pozo para su instalación y para su funcionamiento adecuado
- Está sujeta a la abrasión por arena
- Presenta un serio problema de mantenimiento cuando se bombea agua corrosiva

Ilustración 9.2 Bomba de turbina vertical lubricada con agua

1 Tuerca de ajuste

Permite el ajuste exacto del impulsor para máximo rendimiento.

2 Eje de descarga

El eje de servicio pesado proporciona máxima accesibilidad para el servicio del conjunto de la caja del premaestopas. Es estándar un eje motor de dos piezas.

3 Conexión prelubricación

4 Adaptador de columna
Acepta columna roscada o brindada.

5 Niple de ajuste

Se rosca directamente en el adaptador de columna. El eje motor de barra se regula exactamente roscando-ele eje en la columna, como se requiera.

6 Cojinete del tazón de descarga

De bronce.

7 Tazón de descarga

De hierro fundido de grano apretado.

8 Eje de la bomba

Sobredimensionado, de acero inoxidable, pulido, de alta resistencia.

9 Tazones intermedios

De hierro fundido de grano apretado; los conductos para agua revestidos de vidrio para eficiencia máxima.

10 Impulsores

De bronce silicioso, diseñado para máxima eficiencia equilibrado de precisión para un funcionamiento suave.

11 Cojinetes de tazones intermedios

De bronce o goma para una larga duración de la bomba, bajo cualquier condición del pozo.

12 Collares de cierre

La construcción de acero asegura el impulsor al eje de la bomba.

13 Collar de arena

Localizado exactamente al cojinete del tazón de succión para eliminar la posible acumulación de arena.

14 Cojinete de tazón de succión

De bronce, con empaque de grasa para una larga duración sin averías.

15 Tubería de aspiración o Cesta de aspiración - opcional

Opcional la tubería de aspiración cortada a la longitud deseada para las mejores condiciones de succión. La cesta proporciona protección contra los sólidos grandes.

Tazones Revestidos de Vidrio

Tazones intermedios de hierro fundido Clase 30 para trabajo pesado, con característica normal de los conductos de agua revestidos de "vitra-glass" para máxima eficiencia y protección de desgaste.

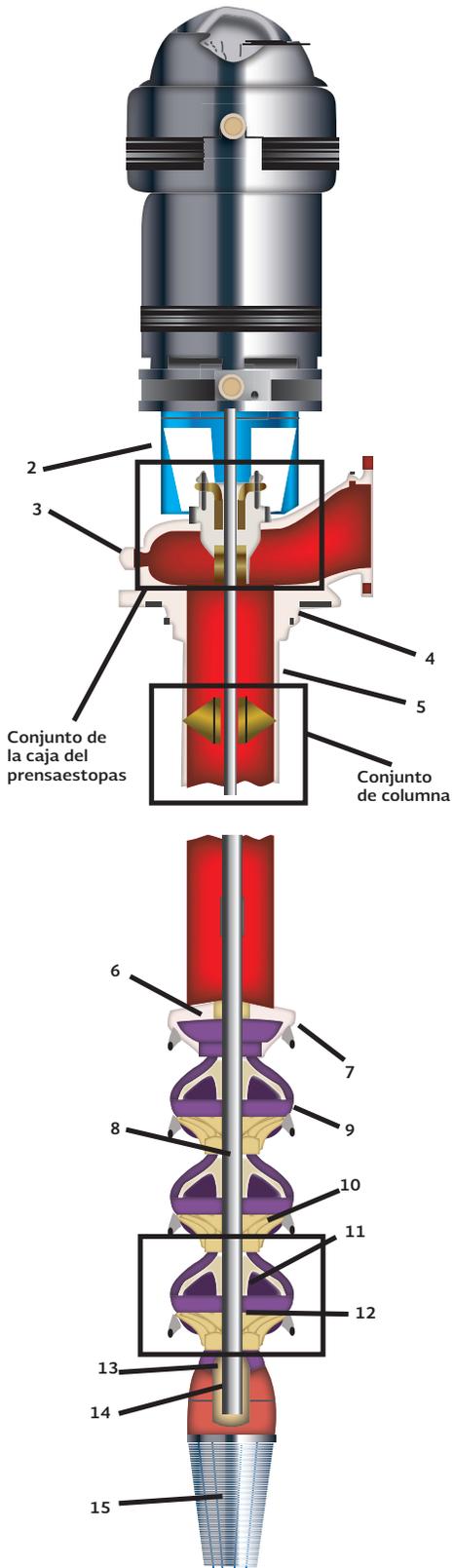
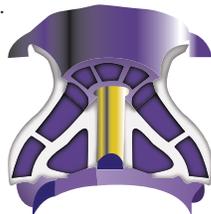
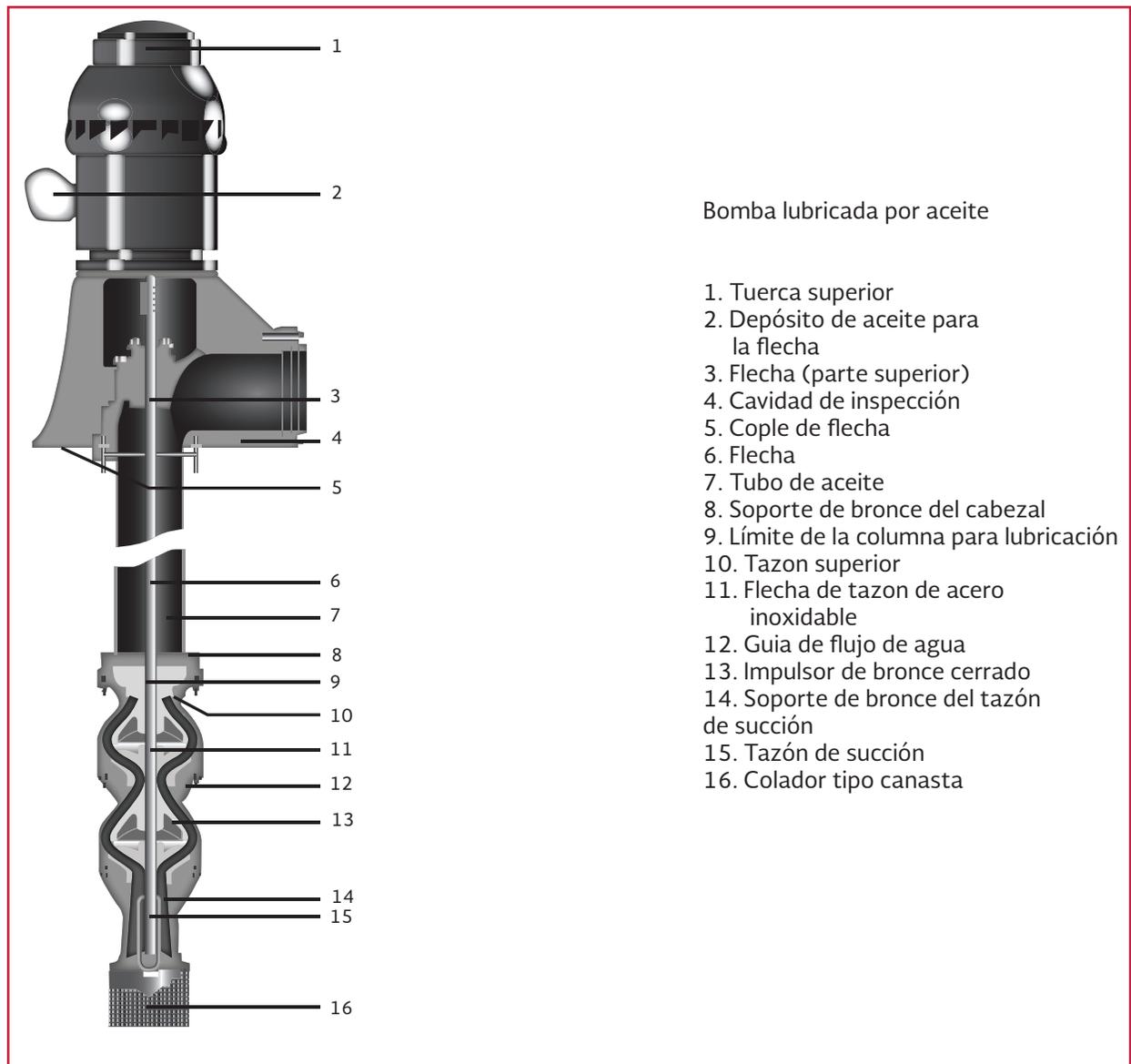


Ilustración 9.3 Bomba de turbina vertical lubricada con aceite



9.1.3. BOMBAS SUMERGIBLES

Consisten de una bomba centrífuga acoplada ajustadamente a un motor, que funciona sumergida en el agua. El motor se ubica por debajo de la toma de la bomba. Su empleo en la actualidad obedece al perfeccionamiento que se ha logrado de los motores, los cables eléctricos y de los sellos herméticos impermeables que operan dentro del agua.

En la Ilustración 9.5 se muestran una bomba sumergible y las partes esenciales que la constituyen.

Ventajas de las bombas sumergibles

- Se pueden programar periodos largos de operación sin problemas de mantenimiento
- Eje corto de la bomba al motor
- La verticalidad y el alineamiento del

Tabla 9.1 Motores eléctricos verticales de flecha hueca

| Potencia CP | Número polos | R/min 60 Hz | Conexión | F.S. | Corriente nominal (AMP) | | A | B | C | D |
|-------------|--------------|-------------|----------|------|-------------------------|-------|-----|------|-----|-----|
| | | | | | 220 V | 440 V | | | | |
| 15 | 4 | 1745 | YY/Y | 1.15 | 39 | 19.5 | 620 | 61 | 180 | 270 |
| 20 | 4 | 1740 | YY/Y | 1.15 | so | 25 | 600 | 82 | 180 | 230 |
| 25 | 4 | 1755 | DD/D | 1.15 | 64 | 32 | 590 | 101 | 165 | 210 |
| 30 | | 1755 | D0/D | 1.15 | 77 | 38.5 | 690 | 122 | 170 | 215 |
| 40 | 4 | 1760 | | | 99 | 49.5 | 605 | 162 | 165 | 225 |
| 50 | 4 | 1760 | DD/D | 1.15 | 124 | 62 | 600 | 202 | 160 | 220 |
| 60 | 4 | 1770 | DD/D | 1.15 | 148 | 74 | 610 | 241 | 160 | 225 |
| 75 | 4 | 1770 | DD/D | 1.15 | 182 | 91 | 6- | | | 225 |
| 100 | 4 | 1775 | DD/D | 1.15 | 240 | 120 | 625 | | 145 | 220 |
| 125 | 4 | 1775 | DD/D | 1.15 | 300 | 150 | 63n | 502 | 215 | 215 |
| 150 | 4 | 1780 | DD/D | 1.15 | 360 | 180 | 630 | 600 | 240 | 240 |
| 200 | 4 | 17135 | DD/D | 1.15 | 490 | 240 | 630 | 798 | 240 | 240 |
| 250 | 4 | 1785 | D | 1.00 | | 295 | 650 | 998 | 240 | 240 |
| 300 | 4 | 1785 | D | 1.00 | | 350 | 650 | 1198 | 190 | 215 |
| 350 | 4 | 1785 | | 1.00 | | 406 | 650 | 1397 | 195 | 215 |

D = Conexión tipo delta

Y = Conexión tipo estrella

A = Corriente de arranque en por ciento de corriente nominal

B = Par nominal en Nm (1 Nm 0.102 kg/m)

C = Par de arranque en por ciento del par nominal

D = Par máximo en por ciento del par nominal

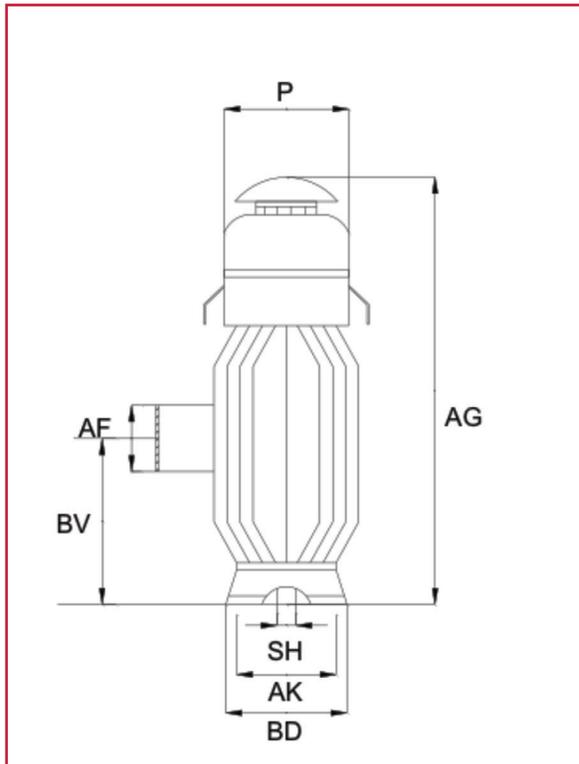
pozo no son importantes. Se presentan menos problemas de mantenimiento debido al reducido desgaste de las partes móviles

- Costos reducidos en la instalación y en la colocación
- Bajo nivel de ruido durante su funcionamiento

Tabla 9.2 Dimensiones generales de los motores verticales (mm)

| Potencia CP 4 polos | AK | BD Max | AF | AG | P | SH | Peso Aprox. kg |
|---------------------|--------|--------|-----|------|-----|-------|----------------|
| 15 | 209.55 | 254 | 115 | 681 | 318 | 34.92 | 135 |
| 20 | 209.55 | 254 | 115 | 724 | 318 | 34.92 | 162 |
| 25 | 209.55 | 254 | 209 | 775 | 359 | 34.92 | 200 |
| 30 | 209.55 | 254 | 209 | 775 | 359 | 34.92 | 214 |
| 40 | 342.9 | 419.1 | 246 | 828 | 401 | 47.62 | 285 |
| 50 | 342.9 | 419.1 | 248 | 828 | 401 | 47.62 | 300 |
| 60 | 342.9 | 419.1 | 293 | 954 | 449 | 47.62 | 415 |
| 75 | 342.9 | 419.1 | 293 | 954 | 449 | 47.62 | 455 |
| 100 | 342.9 | 419.1 | 293 | 1094 | 502 | 50.8 | 615 |
| 125 | 342.9 | 419.1 | 285 | 1220 | 564 | 50.8 | 830 |
| 150 | 342.9 | 419.1 | 285 | 1220 | 564 | 50.8 | 850 |
| 200 | 342.9 | 508 | 325 | 1324 | 587 | 50.8 | 1120 |
| 250 | 342.9 | 508 | 325 | 1324 | 587 | 50.8 | 1150 |
| 300 | 342.9 | 622.3 | | 1539 | 676 | 69.85 | 1400 |

Ilustración 9.4 Dimensiones generales de los motores verticales



- Se pueden colocar a profundidades de hasta 150 m (presión superior a 14 kg/cm²)

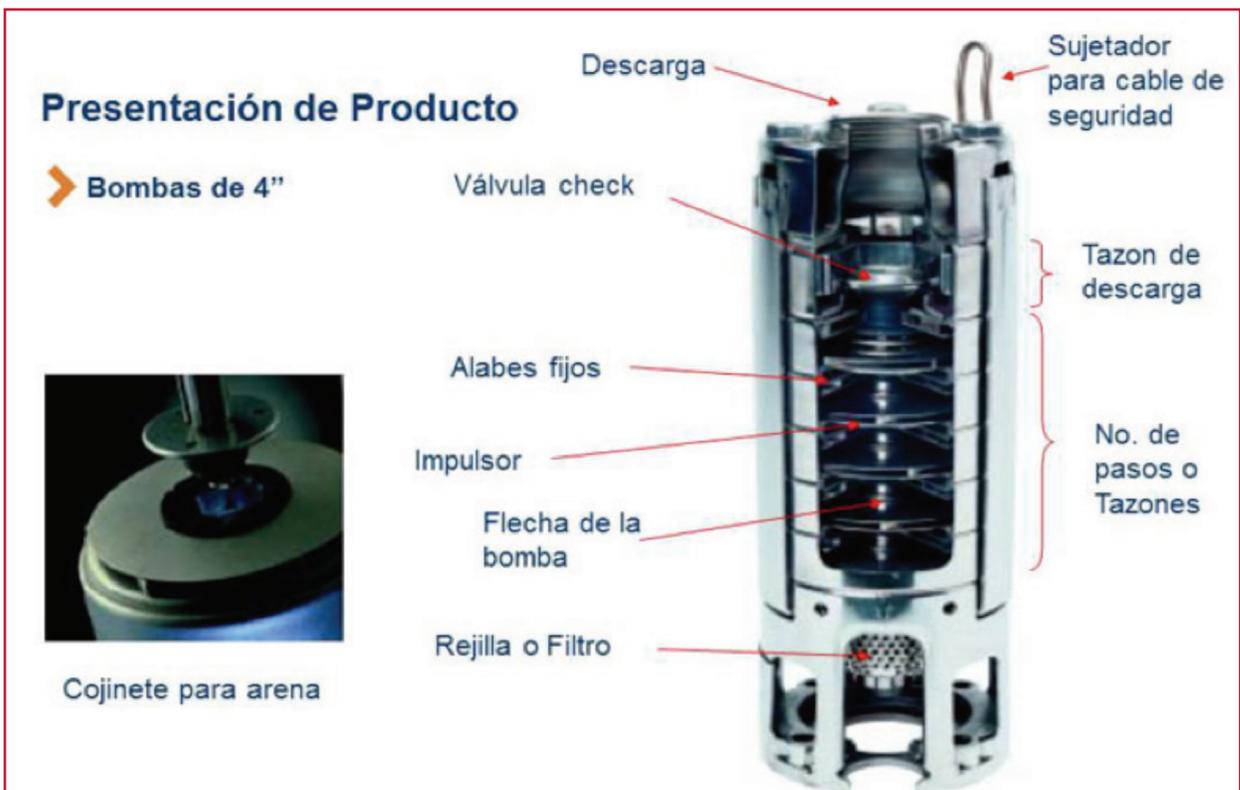
Desventajas de las bombas sumergibles

- La reparación del motor o de la bomba requiere que se extraiga del pozo
- Está sujeta a la abrasión por arena
- Puede acarrear problemas eléctricos causados por los cables sumergidos del motor

9.1.4. BOMBAS DE CHORRO

Consisten en la combinación de un eyector y una bomba centrífuga. Elevan el agua a partir de profundidades mayores que la profundidad en la que opera la bomba centrífuga de turbina vertical. Los componentes básicos de los eyectores se muestran en la Ilustración 9.6.

Ilustración 9.5 Partes que integran una bomba sumergible



Las bombas de chorro son ineficientes, pero tienen algunas ventajas y su empleo se ha generalizado principalmente en instalaciones pequeñas.

Ventajas de las bombas de chorro

El acceso a las partes móviles de la bomba es cómodo, en la superficie del terreno
 No tienen partes móviles dentro del pozo.
 Su precio y los gastos de mantenimiento son bajos

Desventajas de las bombas de chorro

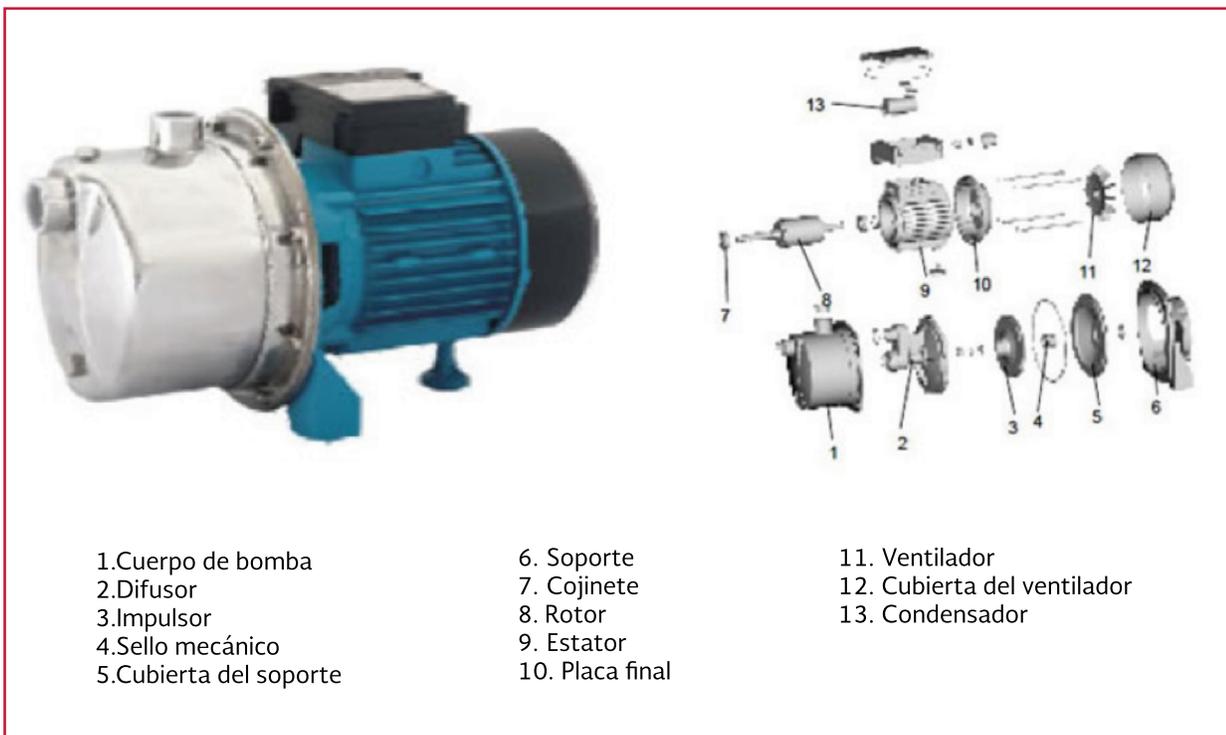
- La cantidad de agua que regresa al eyector aumenta con el incremento de su altura y se reduce su capacidad
- La boquilla del eyector debe estar sumergida por lo menos 1.5 m
- La entrada de aire en la línea de aspiración interrumpe el bombeo

9.2. SELECCIÓN DE LA BOMBA

Para seleccionar apropiadamente una bomba se deben considerar varios factores:

- Rendimiento del pozo. No es posible extraer más agua de un pozo que la cantidad determinada por su rendimiento máximo
- Tipo de energía disponible. No todos los equipos de bombeo son adaptables a cualquier tipo de energía
- Algunos tipos de bombas son más eficientes que otras dependiendo de la profundidad al nivel de bombeo y de la carga total
- Precio y costo de operación
- Disponibilidad de piezas de repuesto y servicio de mantenimiento

Ilustración 9.6 Bomba de chorro



- 1. Cuerpo de bomba
- 2. Difusor
- 3. Impulsor
- 4. Sello mecánico
- 5. Cubierta del soporte

- 6. Soporte
- 7. Cojinete
- 8. Rotor
- 9. Estator
- 10. Placa final

- 11. Ventilador
- 12. Cubierta del ventilador
- 13. Condensador

En la Tabla 9.3 se proporciona una guía para la selección de bombas. En ella se resumen las condiciones en las que deben usarse los diferentes tipos de bombas tratados en este capítulo.

La Tabla 9.1 y Tabla 9.4 es una guía para la elevación de la potencia de la bomba en relación al gasto requerido y diferentes alturas. Las tablas están preparadas para usarse solo como guías generales, ya que la decisión real depende de diferentes factores como los inherentes al uso.

9.3. EQUIPO ELÉCTRICO

Por lo general el equipo eléctrico de un pozo está formado por la subestación eléctrica y la distribución de fuerza que alimenta el motor que acciona el equipo de bombeo.

9.3.1. SUBESTACIÓN ELÉCTRICA

Está compuesta por la acometida, el equipo de protección en alta tensión y el transformador.

9.3.1.1. Acometida

Es el segmento de líneas de transmisión que va desde la derivación de la línea de transmisión

principal de CFE, hasta el equipo de protección de alta tensión de la instalación.

El equipo de protección de alta tensión del sistema eléctrico comprende los siguientes dispositivos:

9.3.1.2. Apartarrayos

Dispositivo que se conecta permanentemente, entre las líneas de alimentación, al sistema y la tierra. Debe operar cuando se presenta una sobretensión (mayor a la tensión nominal), y descarga la corriente directamente a tierra, protegiendo de esta manera al transformador. En la Tabla 9.5 se muestran las características eléctricas de este dispositivo.

9.3.1.3. Fusibles cortacircuito

Dependiendo del suministro de alta tensión, es necesaria la selección de los fusibles cortacircuito, que sirven para proteger al transformador de sobrecorrientes debidas a sobrecargas o a cortocircuitos. Este dispositivo sirve también como un medio de conexión o desconexión del transformador de alta tensión. En las Tabla 9.6 y Tabla 9.7 se indican algunas características eléctricas de los fusibles cortacircuito.

Tabla 9.3 Guía para la selección de bombas

| Tipo de bomba | Altura práctica de aspiración (m) | Profundidad usual de bombeo (m) | Ventajas | Desventajas | Observaciones |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| De movimiento alterno 1. De superficie 2. De pozo profundo | 66.75 66.75 | 15-65 hasta 183 sobre el cilindro | 1. Acción positiva 2. Descarga constante bajo cargas de presión variable 3. Gran flexibilidad para demandas variables 4. Capaz de bombear agua con arena y limo 5. Especial para baja capacidad y grandes alturas | 264 mm (10") m ³ /m | 305 mm (12") m ³ /m |

Tabla 9.3 Guía para la selección de bombas (continuación)

| Tipo de bomba | Altura práctica de aspiración (m) | Profundidad usual de bombeo (m) | Ventajas | Desventajas | Observaciones |
|--|-----------------------------------|---------------------------------|--|--|--|
| 1. De superficie (engrane o alabe) | 6.6 | 15-75 | 1. Acción positiva 2. Descarga constante bajo presión variable 3. Funcionamiento eficaz | 1. Sujeta a desgaste rápido por arena y limo 2. Por desgaste reducción de eficiencia | 1. Apropiaada para Trabajar a baja velocidad 2. Adaptable para operación manual |
| 2. De pozo profundo (rotor helicoidal) | | | 1. Las mismas que la anterior 2. Solo una parta movable dentro del pozo | 1. Desgaste rápido por arena o limo | 1. Estator de caucho que aumenta la duración de la bomba 2. Apropiaada para baja capacidad y carga alta |
| Centrífuga 1 - De superficie a. Caracol (paso sencillo) | 8.1 | 35-45 | 1. Flujo uniforme 2. Bombea con limo y arena 3. Trabaja con presión uniforme 4. Bajo par de torsión de arranque S. Confiable | 1. Pierde cebado 2. Solo funciona bien trabajando de acuerdo a diseño | 1. Mejores eficiencias a descargas próximas a 3 L/s y cargas hasta de 140 m aprox. |
| b. De turbina (paso sencillo) | 8.4 | 35-85 | 1. Mismas que la anterior 2. Autocebantes | 1. No bombea agua con limo y arena | 1. Reducción de presión con capacidad creciente |
| 2. Pozo profundo a. Turbina de eje maestro vertical (paso múltiple) | Impulsores sumergidos | 35-270 | 1. Mismas que turbina de tipo superficie | 1. Solo funciona bien al trabajar sobre diseño 2. Requiere de verticalidad en el pozo 3. Se debe lubricar bien el eje maestro 4. Sujeta a abrasión por aire | 1. Elevado mantenimiento al bombear aguas corrosivas |
| b. Turbina sumergible (paso múltiple) | Bomba y motor sumergidos | 15-135 | 1. Mismas que turbina de tipo superficie 2. Eje corto de la bomba al motor 3. Verticalidad de pozo menos necesaria 4. Menos mantenimiento que la anterior 5. Costos bajos de instalación y colocación 6. Bajos niveles de ruido | 1. La reparación del motor o de la bomba requiere que se saquen del pozo 2. La reparación del motor puede requerir su envío al fabricante 3. Sujeta a abrasión por arena | 1. Debido al buen diseño eléctrico, no se requiere mantenimiento constante 2. El motor debe protegerse a través de un dispositivo especial contra fallas de energía |
| Chorro pozo Profundo | 20-100 | 25-45 | 1. Operación sencilla 2. No presenta ninguna parte movable dentro del pozo 3. Grado de compra y gastos de mantenimiento bajos | 1. Ineficiente 2. Capacidad reducida al aumentar la altura 3. Aire en la línea de aspiración o de retomo interrumpe el bombeo | 1. El agua que regresa al evector aumenta al incrementarse la altura 2. Descarga limitada a 1.5 L/s |

Tabla 9.4 Guía para la elevación de la potencia de la bomba en relación al gasto requerido y diferentes alturas

| Litros por seg | Potencia teórica requerida para elevar agua a diferentes alturas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | Altura en metros | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1.5 | 3.05 | 4.57 | 6.10 | 7.62 | 9.14 | 10.67 | 12.10 | 13.72 | 15.24 | 18.39 | 21.34 | 24.38 | 27.43 | 30.48 | 38.10 | 45.72 | 53.34 | 80.96 | 76.2 | 91.44 | 106.66 | 121.92 | |
| 0.23 | 0.006 | 0.013 | 0.019 | 0.025 | 0.032 | 0.038 | 0.044 | 0.051 | 0.057 | 0.063 | 0.070 | 0.084 | 0.101 | 0.114 | 0.126 | 0.15e | 0.19 | 0.221 | 0.253 | 0.316 | 0.379 | 0.442 | 0.505 | 0.568 |
| 0.63 | 0.013 | 0.025 | 0.038 | 0.051 | 0.063 | 0.076 | 0.088 | 0.101 | 0.114 | 0.126 | 0.152 | 0.177 | 0.202 | 0.227 | 0.253 | 0.316 | 0.379 | 0.442 | 0.505 | 0.532 | 0.758 | 0.884 | 1.011 | 1.137 |
| 0.95 | 0.019 | 0.038 | 0.057 | 0.076 | 0.095 | 0.114 | 0.133 | 0.152 | 0.171 | 0.19 | 0.227 | 0.265 | 0.303 | 0.341 | 0.379 | 0.474 | 0.568 | 0.683 | 0.758 | 0.947 | 1.137 | 1.320 | 1.516 | 1.702 |
| 1.26 | 0.025 | 0.051 | 0.076 | 0.101 | 0.125 | 0.152 | 0.177 | 0.202 | 0.227 | 0.253 | 0.303 | 0.354 | 0.404 | 0.455 | 0.505 | 0.632 | 0.758 | 0.884 | 1.011 | 1.263 | 1.516 | 1.768 | 2.021 | 2.274 |
| 1.58 | 0.032 | 0.063 | 0.095 | 0.126 | 0.158 | 0.19 | 0.221 | 0.253 | 0.284 | 0.316 | 0.379 | 0.442 | 0.505 | 0.568 | 0.632 | 0.79 | 0.947 | 1.105 | 1.263 | 1.579 | 1.895 | 2.211 | 2.526 | 2.842 |
| 1.89 | 0.038 | 0.078 | 0.114 | 0.152 | 0.19 | 0.227 | 0.265 | 0.303 | 0.341 | 0.379 | 0.455 | 0.531 | 0.606 | 0.682 | 0.758 | 0.947 | 1.137 | 1.326 | 1.516 | 1.895 | 2.274 | 2.653 | 3.032 | 3.411 |
| 2.21 | 0.044 | 0.088 | 0.133 | 0.177 | 0.221 | 0.265 | 0.31 | 0.354 | 0.395 | 0.442 | 0.531 | 0.619 | 0.707 | 0.796 | 0.884 | 1.105 | 1.326 | 1.547 | 1.768 | 2.211 | 2.655 | 3.095 | 3.537 | 3.979 |
| 2.52 | 0.051 | 0.101 | 0.152 | 0.202 | 0.253 | 0.303 | 0.354 | 0.404 | 0.455 | 0.505 | 0.606 | 0.707 | 0.808 | 0.91 | 1.011 | 1.263 | 1.516 | 1.768 | 2.021 | 2.526 | 3.032 | 3.537 | 4.042 | 4.548 |
| 2.84 | 0.057 | 0.114 | 0.171 | 0.227 | 0.284 | 0.341 | 0.398 | 0.455 | 0.512 | 0.568 | 0.682 | 0.796 | 0.91 | 1.023 | 1.137 | 1.421 | 1.705 | 1.90 | 2.274 | 2.842 | 3.411 | 3.979 | 4.548 | 5.053 |
| 3.15 | 0.063 | 0.126 | 0.19 | 0.253 | 0.316 | 0.379 | 0.442 | 0.505 | 0.566 | 0.632 | 0.758 | 0.884 | 1.011 | 1.137 | 1.263 | 1.579 | 1.895 | 2.211 | 2.528 | 3.158 | 3.79 | 4.421 | 5.053 | 5.684 |
| 3.79 | 0.076 | 0.152 | 0.227 | 0.303 | 0.379 | 0.455 | 0.531 | 0.606 | 0.682 | 0.758 | 0.91 | 1.061 | 1.213 | 1.364 | 1.516 | 1.895 | 2.274 | 2.653 | 3.092 | 3.79 | 4.548 | 5.305 | 6.063 | 6.821 |
| 4.42 | 0.088 | 0.177 | 0.265 | 0.354 | 0.442 | 0.531 | 0.619 | 0.707 | 0.796 | 0.884 | 1.061 | 1.238 | 1.415 | 1.592 | 1.768 | 2.211 | 2.653 | 3.095 | 3.537 | 4.421 | 5.305 | 6.19 | 7.074 | 7.963 |
| 5.05 | 0.101 | 0.202 | 0.303 | 0.404 | 0.505 | 0.606 | 0.707 | 0.808 | 0.91 | 1.011 | 1.213 | 1.415 | 1.617 | 1.819 | 2.021 | 2.526 | 3.032 | 3.537 | 4.042 | 5.053 | 6.063 | 7.074 | 8.084 | 9.095 |
| 5.66 | 0.114 | 0.227 | 0.341 | 0.455 | 0.588 | 0.682 | 0.796 | 0.91 | 1.023 | 1.137 | 1.364 | 1.592 | 1.819 | 2.046 | 2.274 | 2.842 | 3.411 | 3.979 | 4.548 | 5.684 | 6.821 | 7.958 | 9.095 | 10.232 |
| 6.31 | 0.126 | 0.253 | 0.379 | 0.505 | 0.532 | 0.758 | 0.884 | 1.011 | 1.137 | 1.263 | 1.516 | 1.768 | 2.021 | 2.274 | 2.526 | 3.159 | 3.79 | 4.421 | 5.053 | 6.316 | 7.579 | 8.842 | 10.11 | 11.37 |
| 7.89 | 0.158 | 0.316 | 0.474 | 0.632 | 0.79 | 0.947 | 1.105 | 1.263 | 1.421 | 1.579 | 1.895 | 2.211 | 2.526 | 2.842 | 3.158 | 3.948 | 4.737 | 5.527 | 6.316 | 7.895 | 8.474 | 11.05 | 12.63 | 14.21 |
| 9.46 | 0.19 | 0.379 | 0.568 | 0.758 | 0.947 | 1.137 | 1.328 | 1.516 | 1.705 | 1.895 | 2.274 | 2.653 | 3.032 | 3.411 | 3.79 | 4.737 | 5.084 | 6.632 | 7.579 | 9.474 | 11.37 | 13.28 | 15.16 | 17.04 |
| 11.04 | 0.221 | 0.442 | 0.663 | 0.884 | 1.105 | 1.326 | 1.547 | 1.768 | 1.99 | 2.211 | 2.653 | 3.095 | 3.537 | 3.979 | 4.421 | 5.527 | 6.632 | 7.737 | 8.842 | 11.05 | 13.26 | 15.47 | 17.68 | 19.89 |
| 12.62 | 0.253 | 0.505 | 0.758 | 1.011 | 1.263 | 1.516 | 1.768 | 2.021 | 2.274 | 2.526 | 3.032 | 3.537 | 4.042 | 4.548 | 5.053 | 6.316 | 7.579 | 8.842 | 10.11 | 12.63 | 15.16 | 17.68 | 20.21 | 22.74 |
| 15.77 | 0.316 | 0.632 | 0.947 | 1.263 | 1.579 | 1.695 | 2.211 | 2.526 | 2.542 | 3.158 | 3.79 | 4.421 | 5.053 | 5.684 | 6.318 | 7.895 | 9.474 | 11.05 | 12.63 | 15.79 | 18.95 | 22.11 | 25.26 | 28.42 |
| 18.93 | 0.379 | 0.758 | 1.137 | 1.516 | 1.895 | 2.274 | 2.653 | 3.032 | 3.411 | 3.794 | 4.548 | 5.305 | 6.063 | 6.821 | 7.579 | 9.474 | 11.37 | 13.26 | 15.16 | 18.95 | 22.74 | 26.53 | 30.31 | 34.11 |
| 22.08 | 0.442 | 0.884 | 1.326 | 1.768 | 2.211 | 2.653 | 3.095 | 3.537 | 3.979 | 4.421 | 5.305 | 6.19 | 7.074 | 7.958 | 8.842 | 11.05 | 13.26 | 15.47 | 17.68 | 22.11 | 26.33 | 30.95 | 35.37 | 39.79 |
| 25.24 | 0.505 | 1.011 | 1.516 | 2.021 | 2.526 | 3.032 | 3.537 | 4.042 | 4.548 | 5.053 | 6.063 | 7.074 | 8.084 | 9.095 | 10.11 | 12.63 | 15.16 | 17.65 | 20.21 | 25.28 | 30.32 | 35.37 | 40.42 | 45.48 |
| 31.55 | 0.632 | 1.263 | 1.895 | 2.526 | 3.158 | 3.79 | 4.421 | 5.053 | 5.684 | 6.316 | 7.579 | 8.842 | 10.11 | 11.37 | 12.63 | 15.79 | 18.95 | 22.11 | 25.26 | 31.58 | 37.9 | 44.21 | 50.53 | 56.84 |

Tabla 9.5 Características eléctricas de apartarayos

| Tensión nominal máximos entre línea y tierra kV - (RNC) | Tensión descarga mínima a 60 Hz eficaces kV (RMC) | Tensión impulso en kV de cresta con onda 1.2 x 50 | Tensión de descarga en kV cresta para ondas de impulso de corriente de 8 x 20 microsegundos y con los valores siguientes de amplitud | | | | | | | | | |
|---|---|---|--|------|------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|
| | | | 150 amp Cresta | | 5 000 amp Cresta | | 10 000 amp Cresta | | 20 000 amp Cresta | | 65 000 amp Cresta | |
| | | | Prom. | máx. | Prom. | máx. | Prom. | máx. | Prom. | máx. | Prom. | máx. |
| 1 | 2 | 3 | 5 | | 6 | | 7 | | 8 | | 9 | |
| 3 | 4.5 | 14 | 9.5 | 10 | 11.9 | 12.4 | 13.3 | 13.8 | 15 | 15.5 | 18 | 19 |
| 6 | 9 | 26 | 18 | 19 | 22 | 23 | 25 | 26 | 28 | 29 | 33 | 35 |
| 10 | 15 | 38 | 29 | 30 | 35.5 | 36.5 | 40 | 41 | 43 | 46 | 50 | 56 |
| 12 | 18 | 49 | 36 | 38 | 44 | 46 | 51 | 52 | 56.5 | 58 | 67 | 71 |
| 15 | 22.5 | 50 | 43 | 45 | 54 | 55 | 61 | 62 | 65 | 70 | 76 | 85 |
| 3 | 27 | 58 | 52 | 54 | 64 | 66 | 73 | 74 | 78 | 83 | 93 | 103 |
| 21 | 31.5 | 63 | 60 | 63 | 73.5 | 77.5 | 83 | 87 | 93.5 | 97 | 114 | 120 |
| 24 | 36 | 67 | 69 | 73 | 85 | 90 | 96 | 100 | 107 | 111 | 131 | 138 |

9.3.1.4. Transformador

Dispositivo eléctrico que reduce el alto voltaje de la acometida a una tensión más baja, adecuada para ser utilizada en la instalación eléctrica del pozo. En la Tabla 9.8 se indican algunas de las capacidades y relaciones de tensiones de transformadores.

9.3.2. DISTRIBUCIÓN DE FUERZA

Es un dispositivo de protección de baja tensión. Comprende los dispositivos de protección en baja tensión, el arrancador y el motor.

Dependiendo de la capacidad del motor, se debe seleccionar la protección contra cortocircuitos o sobrecorrientes ocasionadas por sobrecargas o atascamiento del motor. Por lo general, este dispositivo es un interruptor termomagnético y se selecciona según su capacidad y el número de fases con las que opera. En la Tabla 9.9 se indican algunas de sus características.

9.3.2.1. Arrancador

Hay dos tipos de arrancadores: de tensión plena y de tensión reducida. Se seleccionan dependiendo de la capacidad del motor y de las características de la instalación. El arrancador también protege al motor contra sobrecargas.

9.3.2.2. Motor

Equipo eléctrico que convierte la energía eléctrica en energía mecánica o hidráulica. Dependiendo de la potencia mecánica solicitada, se debe seleccionar la potencia del motor eléctrico. En las Tabla 9.10 se describen algunos parámetros técnico eléctricos de los motores.

Para consultar más especificaciones relacionadas con el diseño y la selección del equipo mecánico y eléctrico, referirse a los libros *Diseño de instalaciones mecánicas*, *Selección de equipo mecánico*, *Diseño de instalaciones eléctricas* y *Selección de equipo eléctrico de MAPAS*.

Tabla 9.6 Datos técnicos del corta circuitos fusible, intemperie, tipo expulsión

| | | | | | | | |
|---------------------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----|-------------|-------------|-------|
| Denominación | | | | kV | 14.4 | 23 | 34.5 |
| Tensión máxima al diseño | | | | kV | 16 | 27 | 38 |
| Tensión aguantable (de prueba) | Terminal a Tierra | A 60 Hz | Seco 1 Min | kV | 35 | 42 | 70 |
| | | | Húmedo 10 S | kV | 30 | 36 | 60 |
| | | | Al impulso con Onda de 1.2*50 s | kV | 95 | 125 | 150 |
| | Terminal a Terminal | A 60 HZ. Seco 1 Min | kV | 35 | 42 | 70 | |
| | | Al impulso con Onda de 1.2*50 s | kV | 95 | 125 | 150 | |
| Tensión de Flameo | A 60 hz | Seco | kV | 75 | 95 | 135 | |
| | | Húmedo | kV | 40 | 50 | 100 | |
| Al impulso con Onda de 1.2*50 s | | | kV | 135 | 170 | 225 | |
| Tensión de perforación AISL | | | | kV | 115 | 145 | 195 |
| Radio Interferencia | Tensión prueba 60 hz | | | kV | 9.41 | 15.66 | 22 |
| | Máxima a 1 Mhz | | | V | 250 | 250 | 250 |
| Corriente nominal | | | | Amp | 100 | 100 | 200 |
| Corriente interruptiva (eficaz) | | | Simétrica | Amp | 5 600/8 000 | 4 000/8 000 | 1 300 |
| | | | Asimétrica | Amp | 800/10 000 | 8 000/8 000 | 2 000 |
| Distancias | Fuga | | | mm | 270 | 394 | |
| | Flameo en seco | | | | 207 | 303 | 592 |

Tabla 9.7 Capacidad en amperes (A) de fusibles para transformadores

| kVA DZL Transformador trifásico | 13 200 V | | 23 000 V | 33 000 V | | 44 000 V | |
|---------------------------------|---------------|------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|
| | A plena carga | A fusibles | A fusibles | A plena carga | A fusibles | A plena carga | A fusibles |
| 4.5 | 0.2 | 1 | 1 | | | | |
| 7.5 | 0.33 | 1 | 1 | | | | |
| 9 | 0.39 | 1.5 | 1 | 0.16 | 1 | | |
| 10 | 0.44 | 1.5 | 1 | 0.17 | 1 | | |
| 15 | 0.66 | 2 | 1.5 | 0.26 | 1 | | |
| 22.5 | 0.90 | 3 | 1.5 | 0.39 | 1.5 | | |
| 25 | 1.09 | 3 | 2 | 0.44 | 1.5 | | |
| 50 | 1.31 | 3 | 2 | 0.52 | 1.5 | | |
| 37.5 | 1.61 | 5 | 3 | 0.66 | 2 | | |
| 45 | 1.91 | 5 | 3 | 0.79 | 2 | 0.59 | 1.5 |
| 50 | 2.19 | 5 | 3 | 0.87 | 2 | 0.66 | 2 |
| 75 | 3.28 | 7 | 5 | 1.31 | 3 | 0.99 | 3 |
| 100 | 4.37 | 10 | 5 | 1.73 | 5 | 1.31 | 3 |
| 112.5 | 4.92 | 10 | 7 | 1.91 | 5 | 1.48 | 5 |
| 150 | 6.56 | 15 | 7 | 2.69 | 5 | 1.97 | 5 |
| 200 | 8.75 | 15 | 10 | 3.5 | 7 | 2.63 | 5 |
| 225 | 9.114 | 20 | 10 | 3.94 | 10 | 2.96 | 7 |
| 300 | 13.1 | 20 | 15 | 5.25 | 10 | 3.94 | 10 |
| 450 | - | 30 | 20 | 7.81 | 15 | 5.92 | 10 |
| 500 | 21.9 | 40 | 20 | 8.74 | 15 | 6.6 | 15 |

Tabla 9.8 Transformadores de alta tensión (15.25 y 34.5 KV)

| Clase 15 kV [NBI 95 kV] | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------|-----|------------------|-----|-----|------|-------------------|---------------------|--------|-------|
| Tensión Secundaria Clase 1.2 Kv | kVA | FIG | Dimensiones (cm) | | | | Peso (kilogramos) | | | |
| | | | A | B | C | D | Núcleo y bobinas | Tanque y accesorios | Aceite | Total |
| 440 y 1254 o 220 y 127 | 15 | 1 | 104 | 62 | 48 | 76 | 164 | 54 | | |
| | 30 | 1 | 114 | 67 | 49 | 86 | 161 | 66 | 20 | 335 |
| | 45 | 2 | 130 | 97 | 49 | 102 | 198 | 106 | 33 | 437 |
| | 75 | 3 | 129 | 92 | 71 | 101 | 250 | 147 | 141 | 538 |
| | 112.5 | 3 | 128 | 105 | 75 | 100 | 393 | 188 | 176 | 757 |
| | 150 | 3 | 132 | 112 | 71 | 105 | 458 | 208 | 233 | 899 |
| | 225 | 4 | 158 | 158 | 102 | 129 | 642 | 388 | 366 | 1394 |
| | 300 | 4 | 162 | 134 | 112 | 135 | 930 | 435 | 435 | 1800 |
| 500 | 4 | 176 | 142 | 137 | 147 | 1190 | 618 | 654 | 2462 | |
| Clase 25 KV [NBI 150 KV] | | | | | | | | | | |
| 440 y 1254 o 220 y 127 | | | A | B | C | D | Núcleo y bobinas | Tanque y accesorios | Aceite | Total |
| | | 1 | | as | 47 | 93 | | 86 | 153 | 384 |
| | 30 | 2 | 138 | 92 | 51 | 104 | 175 | 138 | 197 | 510 |
| | 45 | 2 | 143 | 93 | 50 | 109 | 200 | 143 | 202 | 545 |
| | 75 | 3 | 146 | 104 | 75 | 112 | 310 | 208 | 270 | 788 |
| | 112.5 | 3 | 158 | 111 | 75 | 124 | 316 | 201 | 386 | 903 |
| | 150 | 3 | 152 | 122 | 78 | 118 | 470 | 288 | 342 | 1100 |
| | 225 | 4 | 171 | 140 | | 137 | 757 | 424 | 485 | 1666 |
| | 300 | 4 | 180 | 142 | 109 | 148 | 896 | 510 | 564 | 1990 |
| | 500 | 4 | 188 | 151 | 113 | 154 | 1385 | 609 | 810 | 2804 |
| | 30 | 1 | 148 | 102 | | | | | 204 | |
| | 45 | 2 | 153 | 108 | 65 | 113 | 300 | 154 | 238 | 690 |
| | 75 | 3 | 158 | 119 | 79 | 118 | 402 | 173 | 254 | 829 |
| | 112.5 | 3 | 167 | 126 | 78 | 127 | 530 | 205 | 388 | 1121 |
| | 150 | 3 | 174 | 126 | 78 | 133 | 577 | 247 | 416 | 1240 |
| | 225 | 4 | 190 | 148 | 110 | 149 | 939 | 468 | 573 | 1980 |
| | 300 | A | 205 | 158 | 114 | 165 | 1121 | 655 | 774 | 2550 |
| 500 | 4 | 210 | 164 | 116 | 189 | 1294 | 734 | 94 | | |

Tabla 9.9 Características de interruptores termomagnéticos

| Prefijo en el núm. de catalogo | Núm. de polos | Corriente nominal | Capacidad interruptiva nominal amperes rmc | | |
|--|------------------|-------------------|--|---------------|-----------|
| | | | Tensión corriente alterna 60 Hz tensión cd | | |
| | | | 280 V | 600 V | 250 V |
| LA-LAL | 2 | 125.4 | 30 | 22 | 10 |
| | 3 | 125.4 | 30 | 22 | |
| LH-LHL | 2 | 125.4 | 30 | 22 | 10 |
| | 3 | 125.4 | 30 | 22 | |
| LA marco 400 amperes, -Tensión máxima 600 VCA. 60 Hz/250 VCD Capacidad interruptiva nominal | | | | | |
| Corriente | Gama de disparo | | Tres polos | | |
| Nominal | Magnético ampere | | | | |
| Amperes | Baja | Alta | Ins. estándar | I-line | |
| 225 | 1 125 | 2 250 | LAL 36 225 | LA 36 225 | |
| 250 | 1 250 | 2 500 | LAL 36 250 | LA 36 250 | |
| 300 | 1 500 | 3 000 | LAL 36 300 | LA 36 300 | |
| 350 | 1 750 | 3 500 | LAL 36 350 | LA 36 350 | |
| 400 | 2 000 | 4 000 | LAL 36 400 | LA 36 400 | |
| LH marco 400 amperes. Tensión máxima 600 VCA. 60 Hz/250 VCA. Capacidad interruptiva alta [palanca gris] 1 - 75 00 | | | | | |
| Corriente | Gama de disparo | | Dos polos | | |
| Nominal | Magnético ampere | | Tres polos | | |
| Amperes | Baja | Alta | I-line | Ins. estándar | I-line |
| 225 | 1 125 | 2 250 | LH 26 225 | LHL 6 225 | LH 36 225 |
| 300 | 1 500 | 3 000 | LH 26 300 | LH 26 300 | LH 36 300 |
| 350 | 1 750 | 3 500 | LH 26 350 | LHL 36 350 | LH 36 350 |
| 400 | 2 000 | 4 000 | LH-26 400 | LHL 36 400 | LH 36 400 |

9.4. DISPOSITIVOS HIDROMÉTRICOS

Son dispositivos que se emplean para medir directamente el caudal instantáneo de un pozo profundo. Los más comunes son el piezómetro con orificio calibrado, los medidores directos tipo hélice y de turbina, y los medidores electrónicos.

9.4.1. PIEZÓMETRO CON ORIFICIO CALIBRADO

Al pasar el agua por un orificio, se ejerce un efecto de drenado del agua, provocando una

contrapresión que se manifiesta como una elevación del agua en una manguera de 5/16" de diámetro (Ilustración 9.7).

9.4.2. MEDIDORES DIRECTOS

Dependiendo del aparato de locomoción que registra la velocidad del agua, los medidores directos pueden ser de hélice y de turbina. Estos dispositivos indican directamente la lectura del gasto por medio de una aguja tipo velocímetro, además de registrar el volumen acumulado en m³.

Tabla 9.10 Motores verticales en 440 V

| HP | Velocidad r/min | | | Eficiencia | | | | Factor de potencia | | | | Corriente en am 40 volts | | | Par a voltaje nominal | | | | Código |
|-------|-----------------|------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-----------|-----------|-----------|--------------------------|-------------|-----------------|-------------------------------------|--------------------------|------------|---------------------------|--------|
| | Sin carga | Plen carga | Plena carga | Plena carga | 3/4 Carga | 1/2 Carga | 1/2 Carga | Plena carga | 3/4 Carga | 1/2 Carga | 1/2 Carga | Plena carga | Plena carga | Roto blo arran. | Para velocidad y carga plena lb/pie | Rotor bloquea (arranque) | Par máximo | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | Porcentaje de plena carga | |
| 2 | 900 | 865 | 78 | 78 | 78 | 68 | 68 | 58 | 48 | 36 | 4.3 | 21 | 12.1 | 130 | 210 | I | | | |
| | 1800 | 1740 | 83.7 | 83.5 | 82.5 | 78 | 71 | 50 | 4.3 | 32 | 9.06 | 215 | 230 | K | | | | | |
| | 1200 | 1155 | 51 | 81 | 75 | 70 | 62 | 48 | 5 | 32 | 13.6 | 155 | 230 | K | | | | | |
| 3 | 900 | 865 | 78 | 76 | 70 | 58 | 50 | 40 | 6.2 | 26 | 18.2 | 130 | 205 | K | | | | | |
| | 3600 | 3500 | 84.5 | 84.5 | 84 | 82 | 78 | 89 | 6.8 | 41 | 7.5 | 150 | 218 | J | | | | | |
| | 1800 | 1740 | 83.2 | 83 | 82 | 80 | 73 | 61 | 7.1 | 46 | 15.1 | 185 | 220 | J | | | | | |
| 5 | 1200 | 1150 | 83 | 83 | 78 | 75 | 66 | 52 | 7.6 | 46 | 22.8 | 150 | 218 | J | | | | | |
| | 900 | 865 | 79 | 77 | 72 | 60 | 55 | 45 | 9.9 | 46 | 30.4 | 130 | 205 | J | | | | | |
| | 3600 | 3500 | 85 | 85 | 84 | 85 | 82 | 74 | 10 | 57 | 11.3 | 140 | 200 | H | | | | | |
| 7-1/2 | 1800 | 1740 | 83.5 | 83.5 | 82.5 | 78 | 72 | 60 | 10.8 | 63.5 | 22.6 | 175 | 215 | H | | | | | |
| | 1200 | 1150 | 84 | 84 | 82 | 78 | 72 | 58 | 10.7 | 63.5 | 34.3 | 150 | 205 | H | | | | | |
| | 900 | 870 | 84 | 83 | 80 | 70 | 62 | 50 | 12 | 65 | 45.5 | 125 | 200 | H | | | | | |
| 10 | 3600 | 3510 | 85 | 85 | 84 | 85 | 82 | 74 | 13 | 78 | 15 | 135 | 200 | H | | | | | |
| | 1800 | 1740 | 86 | 85 | 85 | 81 | 78 | 65 | 13.5 | 82 | 30.1 | 165 | 200 | H | | | | | |
| | 1200 | 1165 | 86 | 86 | 84 | 80 | 74 | 62 | 13.5 | 88 | 45.1 | 150 | 200 | H | | | | | |
| 15 | 900 | 865 | 84 | 84 | 82 | 74 | 66 | 55 | 15.1 | 75 | 60.7 | -125 | 200 | H | | | | | |
| | 3600 | 3500 | 87 | 87 | 84 | 87 | 86 | 79 | 18.6 | 102 | 22.5 | 130 | 200 | G | | | | | |
| | 1800 | 1760 | 88 | 88 | 87 | 80 | 76 | 62 | 20 | 112 | 44.7 | 160 | 200 | G | | | | | |
| 20 | 1200 | 1155 | 87 | 87 | 86.5 | 82 | 78 | 65 | 19.7 | 116 | 68.2 | 140 | 200 | G | | | | | |
| | 900 | 865 | 85 | 85 | 83 | 74 | 66 | 55 | 22.4 | 118 | 91.1 | 125 | 200 | G | | | | | |
| | 3600 | 3520 | 89 | 89 | 87 | 88 | 85 | 79 | 24 | 145 | 29.8 | 130 | 200 | G | | | | | |
| 20 | 1800 | 1750 | 89 | 89 | 88 | 82 | 75 | 64 | 25.7 | 158 | 59.7 | 150 | 200 | G | | | | | |
| | 1200 | 1150 | 86 | 85 | 85.5 | 83 | 80 | 69 | 26.2 | 145 | 91.3 | 133 | 200 | G | | | | | |
| | 900 | 875 | 87 | 87 | 86 | 73 | 66 | 56 | 29.1 | 144 | 120 | 125 | 200 | G | | | | | |

Tabla 9.10 Motores verticales en 440 V (continuación)

| HP | Velocidad r/min | | | Eficiencia | | | Factor de potencia | | | Corriente en am 40 volts | | | Par a voltaje nominal | | | | Código |
|----|-----------------|-------------|-------------|------------|-----------|-------------|--------------------|-----------|-------------|--------------------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------|------------|---------------------------|-----------|--------|
| | Sin carga | Plena carga | Plena carga | 3/4 Carga | 1/2 Carga | Plena carga | 3/4 Carga | 1/2 Carga | Plena carga | Plena carga | Roto blo arran. | Para velocidad y carga lb/pie | Rotor bloquea (arranque) | Par máximo | Porcentaje de plena carga | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 3/4 Carga | |
| 25 | 3600 | 3510 | 89 | 89 | 87 | 88 | 85 | 79 | 29.6 | 176 | 37.4 | 130 | 200 | G | | | |
| | 1800 | 1755 | 89 | 88 | 87 | 83 | 79 | 72 | 31.7 | 183 | 74.8 | 150 | 200 | G | | | |
| | 1200 | 1175 | 89.5 | 89.5 | 89 | 81 | 76 | 57 | 32.4 | 197 | 111 | 133 | 200 | G | | | |
| | 900 | 875 | 87.5 | 87.35 | 86 | 71 | 63 | 48 | 37.7 | 197 | 150 | 125 | 200 | G | | | |
| 30 | 3600 | 3515 | 89 | 89 | 88 | 88 | 87 | 81 | 35.9 | 193 | 44.8 | 130 | 200 | G | | | |
| | 1800 | 1780 | 89.5 | 89 | 88 | 83 | 77 | 57 | 38 | 226 | 89.5 | 150 | 200 | G | | | |
| | 1200 | 1175 | 89.5 | 89.5 | 89 | 81.5 | 77 | 68 | 38.5 | 232 | 134 | 135 | 200 | G | | | |
| | 900 | 875 | 88 | 87.5 | 87 | 74 | 68 | 58 | 43.2 | 215 | 180 | 128 | 200 | G | | | |
| 40 | 3600 | 3510 | 90 | 90 | 89 | 89 | 87 | 81 | 48.8 | 287 | 59.9 | 125 | 200 | G | | | |
| | 1800 | 1765 | 89 | 89 | 88 | 88 | 84 | 77 | 49 | 290 | 119 | 140 | 200 | G | | | |
| | 1200 | 1170 | 88.5 | 88.5 | 88 | 82 | 78 | 68 | 51.8 | 270 | 179 | 136 | 200 | G | | | |
| | 900 | 875 | 88 | 88 | 86 | 74 | 68 | 56 | 57.5 | 285 | 240 | 125 | 200 | G | | | |
| 50 | 3600 | 3545 | 90 | 90 | 88 | 87 | 85 | 80 | 60 | 350 | 74.1 | 120 | 200 | G | | | |
| | 1800 | 1765 | 90.5 | 90.5 | 90 | 86 | 84 | 78 | 600.2 | 370 | 149 | 140 | 200 | G | | | |
| | 1200 | 1170 | 90 | 90 | 89 | 82.5 | 79 | 69 | 63 | 350 | 224 | 135 | 200 | G | | | |
| | 900 | 875 | 89 | 88.3 | 87 | 78 | 73 | 60 | 67.5 | 350 | 300 | 125 | 200 | G | | | |
| 60 | 3600 | 3535 | 90 | 90 | 89 | 89 | 87 | 81 | 70 | 392 | 89.1 | 120 | 200 | G | | | |
| | 1800 | 1765 | 91 | 91 | 90 | 88 | 84 | 77 | 72 | 475 | 176 | 140 | 200 | G | | | |
| | 1200 | 1175 | 90.5 | 90.5 | 89.5 | 84 | 80 | 70 | 74 | 454 | 268 | 135 | 200 | G | | | |
| | 900 | 875 | 90 | 90 | 88 | 79 | 75 | 63 | 79 | 425 | 360c | 125 | 200 | G | | | |
| 70 | 3600 | 3530 | 90.5 | 90.5 | 90 | 89 | 87 | 81 | 87.3 | 500 | 111 | 105 | 200 | G | | | |
| | 1800 | 1765 | 91.4 | 90 | 90 | 85 | 84 | 77 | 89.5 | 555 | 223 | 140 | 200 | G | | | |
| | 1200 | 1170 | 90.5 | 90.5 | 90 | 85.5 | 82 | 73 | 91 | 525 | 336 | 135 | 200 | G | | | |
| | 900 | 880 | 91 | 91 | 90 | 81 | 75 | 64 | 95 | 523 | 448 | 125 | 200 | G | | | |

Tabla 9.11 Motores verticales en 220 V

| HP | Velocidad r/min | | Eficiencia | | | | Factor de potencia | | | | Corriente en amp 220 volts | Para tensión nominal | | |
|-------|-----------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-----------|-----------|-------------------------------------|----------------------------|--------------------------|-----|--|
| | Sin carga | Plena carga | Plena carga | 3/4 Carga | 1/2 Carga | Con carga | 3/4 Carga | 1/2 Carga | 1/2 Carga | Para velocidad y carga plena lb/pie | | Rotor blagueador (arran) | Par | |
| | | | | | | | | | | Porcentaje de | Máximo | Plena carga | | |
| 1 1/2 | 1200 | 1140 | 75.5 | 76.5 | 73.9 | 71.2 | 62.2 | 49.2 | 5.48 | 8.9 | 186 | 250 | | |
| | 1200 | 1140 | 77 | 78 | 76.1 | 71.6 | 63.2 | 50 | 7.06 | 9.2 | 180 | 240 | | |
| 2 | 900 | 870 | 77.1 | 76.1 | 71.6 | 57.5 | 49.2 | 36.4 | 8.8 | 12 | 130 | 210 | | |
| | 3600 | 3515 | 82.7 | 82.5 | 79.6 | 83.5 | 77.6 | 66.7 | 8.48 | 4.5 | 180 | 240 | | |
| 3 | 1800 | 1735 | 81.8 | 82.5 | 80.6 | 82.4 | 75.9 | 64.1 | 8.7 | 9 | 215 | 250 | | |
| | 1200 | 1100 | 83.4 | 83.9 | 81.8 | 72.6 | 57.2 | 55.2 | 9.54 | 13.6 | 155 | 230 | | |
| 900 | 860 | 860 | 79.6 | 79.6 | 76.6 | 60.7 | 54 | 42.9 | 12.2 | 18.3 | 130 | 206 | | |
| | 3600 | 3505 | 85.4 | 86.1 | 84.7 | 87.5 | 83.9 | 75.7 | 13 | 7.48 | 150 | 215 | | |
| 5 | 1800 | 1729 | 84.8 | 87.1 | 87.3 | 64.8 | 79.2 | 68.2 | 13.6 | 15.2 | 185 | 225 | | |
| | 1200 | 1160 | 83.1 | 83.9 | 82.2 | 73.7 | 67.7 | 56.8 | 15.96 | 22.6 | 180 | 215 | | |
| 900 | 875 | 82.3 | 81.3 | 78 | 72.2 | 64.3 | 52.1 | 16.4 | 30 | 130 | 205 | | | |
| | 3600 | 3480 | 85.6 | 87 | 86.4 | 87.3 | 83 | 75.1 | 19.6 | 11.3 | 140 | 200 | | |
| 7 1/2 | 1800 | 1740 | 86.3 | 86.2 | 84.9 | 84 | 79.1 | 69.4 | 20.5 | 22.6 | 175 | 215 | | |
| | 1200 | 1185 | 84.4 | 84.5 | 82.2 | 83.1 | 77.9 | 67.5 | 20.9 | 33.8 | 150 | 205 | | |
| 900 | 865 | 83.2 | 84 | 82.1 | 78 | 72 | 61 | 22.5 | 45.5 | 125 | 200 | | | |
| | 3600 | 3625 | 87.9 | 87.8 | 85.8 | 81.1 | 75.3 | 64.1 | 27.9 | 14.9 | 135 | 200 | | |
| 10 | 1800 | 1736 | 86.3 | 87.6 | 87.1 | 86.4 | 83.6 | 76.5 | 26.2 | 30.2 | 185 | 200 | | |
| | 1200 | 1180 | 85.2 | 85.6 | 83.6 | 84.9 | 80.7 | 71.5 | 27 | 45.2 | 150 | 200 | | |
| 900 | 875 | 85.7 | 86.5 | 85.2 | 73 | 87.1 | 56.2 | 31.2 | 60 | 125 | 200 | | | |
| | 3600 | 3525 | 86.5 | 89.7 | 89.2 | 88.2 | 86.5 | 80.7 | 37.6 | 22.4 | 130 | 200 | | |
| 15 | 1800 | 1780 | 87.7 | 88.6 | 87.7 | 84.4 | 80.5 | 71.4 | 39.6 | 44.7 | 160 | 200 | | |
| | 1200 | 1170 | 88 | 88.9 | 88 | 80.9 | 78.9 | 87.5 | 41.2 | 67.2 | 140 | 200 | | |
| 900 | 875 | 86.7 | 87.4 | 88.2 | 88.2 | 71.7 | 85.4 | 54 | 47.1 | 90 | 200 | | | |
| | 3600 | 3525 | 8.5 | 89.2 | 88.2 | 88 | 86.4 | 80.9 | 60.2 | 29.8 | 130 | 200 | | |
| 20 | 1800 | 1760 | 88.9 | 90.1 | 89.7 | 86 | 83.4 | 77.5 | 51.6 | 59.8 | 150 | 200 | | |
| | 1200 | 1165 | 87.2 | 88.6 | 88.8 | 82.7 | 80 | 72.4 | 54.2 | 90 | 155 | 200 | | |
| 900 | 885 | 87.8 | 88.3 | 87 | 80 | 758 | 87.4 | 55.6 | 118.6 | 125 | 200 | | | |
| | 3600 | 3515 | 68.9 | 89.9 | 89.2 | 88.7 | 87.6 | 82.9 | 62 | 37.3 | 130 | 200 | | |

Tabla 9.11 Motores verticales en 220 V (continuación)

| HP | Velocidad r/min | | Eficiencia | | | | Factor de potencia | | | Corriente en amp 220 volts | Para tensión nominal | | |
|-----|-----------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-----------|-----------|----------------------------|------------------------------|-----|--------------------------|
| | Sin carga | Plena carga | Plena carga | 3/4 Carga | 1/2 Carga | Con carga | 3/4 Carga | 1/2 Carga | 1/2 Carga | | Para velocidad y carga plena | | Rotor blaquoador (arran) |
| | | | | | | | | | | Porcentaje de | Plena carga | | |
| 25 | 1800 | 1765 | 66 | 89.2 | 88.8 | 86.1 | 85.4 | 78.5 | 63 | 74.5 | 150 | 200 | |
| | 1200 | 1160 | 67.2 | 88.5 | 87.9 | 76.3 | 71.1 | 60.2 | 73.4 | 11.2 | 135 | 200 | |
| 30 | 900 | 860 | 65.7 | 80.9 | 86.2 | 80.7 | 76.1 | 66.6 | 70.7 | 149 | 125 | 200 | |
| | 3600 | 3515 | 67.2 | 88.6 | 88 | 87.3 | 86.5 | 61.7 | 77 | 44.8 | 130 | 200 | |
| | 1800 | 1760 | 66.4 | 89.7 | 89.3 | 87.1 | 84.1 | 76.4 | 78.1 | 89.3 | 150 | 200 | |
| | 1200 | 1160 | 69.5 | 89.9 | 88.7 | 86.9 | 64.7 | 78.8 | 76.4 | 133.3 | 135 | 200 | |
| 40 | 900 | 880 | 88.3 | 89 | 88 | 76.5 | 73.9 | 84.1 | 84.5 | 179 | 125 | 200 | |
| | 3600 | 3510 | 87.3 | 89 | 88.9 | 86.9 | 85.9 | 80.7 | 103.1 | 59.4 | 125 | 200 | |
| | 1800 | 1770 | 39.8 | 90.8 | 90.6 | 86.2 | 88.7 | 81.6 | 96.9 | 116.6 | 140 | 200 | |
| | 1200 | 1175 | 39.7 | 90.3 | 89.5 | 85.8 | 85 | 75.8 | 101.6 | 176.7 | 135 | 200 | |
| 50 | 900 | 880 | 89.1 | 90 | 89.4 | 80.4 | 78.8 | 67.8 | 109.3 | 238.8 | 125 | 200 | |
| | 3600 | 3538 | 90.2 | 91 | 90.5 | 89.9 | 90.8 | 89 | 120.6 | 74.2 | 120 | 200 | |
| | 1800 | 1170 | 90.5 | 91.5 | 91.4 | 88.1 | 86.4 | 81.1 | 122.7 | 146.2 | 140 | 200 | |
| | 1200 | 1175 | 88.5 | 89.9 | 89.9 | 87.9 | 80.5 | 81.8 | 125.7 | 223.4 | 135 | 200 | |
| 60 | 900 | 882 | 90 | 90.7 | 90.7 | 73.5 | 88.3 | 57.9 | 148.2 | 148.2 | 125 | 200 | |
| | 3600 | 3530 | 88.5 | 90.2 | 90.4 | 90.1 | 91 | 89.5 | 147.1 | 89.2 | 120 | 200 | |
| | 1800 | 1770 | 90.5 | 91.9 | 92 | 85.9 | 87.1 | 64.2 | 149.1 | 175 | 140 | 200 | |
| | 1200 | 1180 | 91.6 | 92.2 | 91.7 | 84.5 | 81.9 | 75 | 151.7 | 287 | 135 | 200 | |
| 70 | 900 | 890 | 87.5 | 88.9 | 88.6 | 81.9 | 78.7 | 70.2 | 183.5 | 356.1 | 125 | 200 | |
| | 3600 | 3530 | 89.7 | 91.2 | 91.2 | 90.4 | 90.7 | 86.8 | 189.5 | 11.5 | 105 | 200 | |
| | 1800 | 1775 | 90.9 | 92 | 91.9 | 86.1 | 84.4 | 76.7 | 187.3 | 221.7 | 140 | 200 | |
| | 1200 | 1177 | 90 | 91.4 | 91.6 | 85 | 82.8 | 75 | 191.5 | 334.8 | 135 | 200 | |
| 900 | 880 | 86.8 | 86.4 | 86.1 | 80.8 | 76.4 | 66.3 | 18 | 445.8 | 125 | 200 | | |

Ilustración 9.7 Piezómetro tipo orificio calibrado

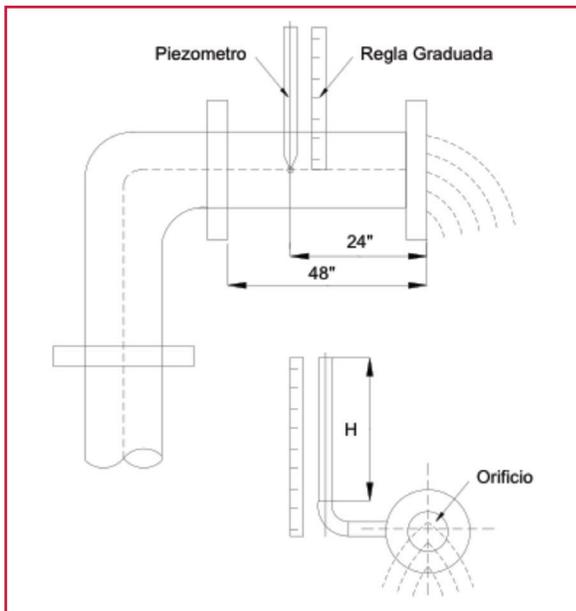
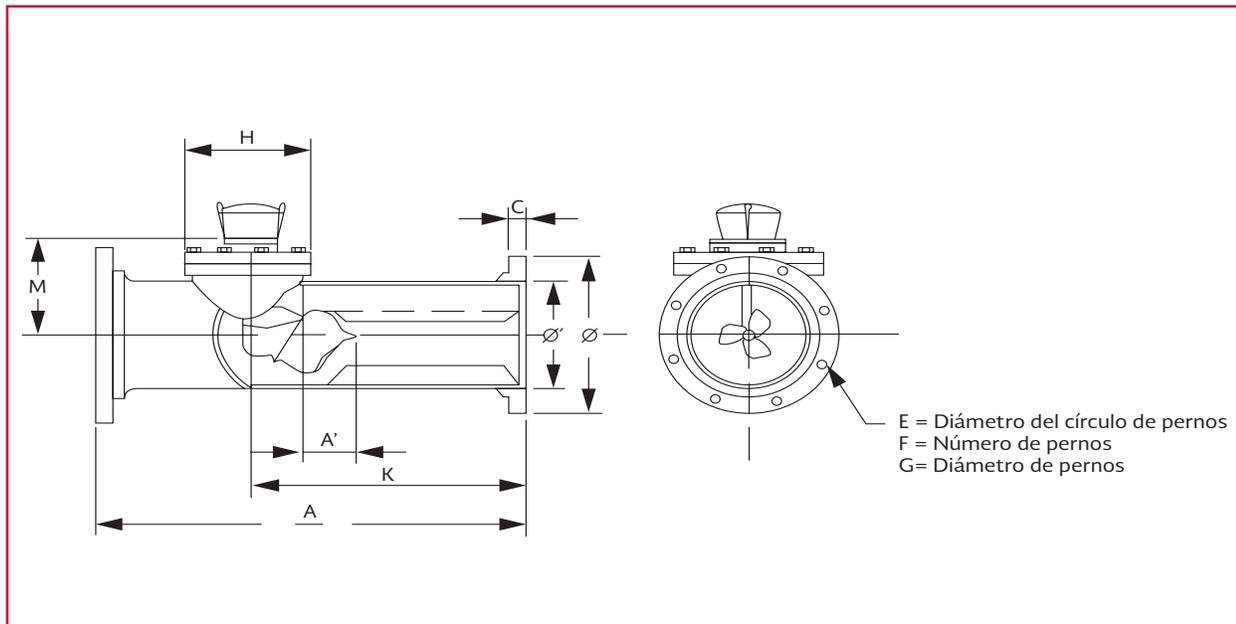


Ilustración 9.8 Medidor tipo hélice



9.4.2.1. Medidores tipo hélice

En el mercado se puede encontrar una gran variedad en tipos y tamaños. Para pozos son recomendables los que tienen el diámetro de salida de 8". Trabajan con presiones de carga de 1.03 MPa (10.5 kg/cm²) y con temperaturas de 650° C; son fáciles de instalar (Ilustración 9.8).

Características

- Tienen transmisión magnética
- El registro es operado por pulsos magnéticos
- Tienen salida opcional de pulsos
- Los baleros son de larga duración
- La caja está sellada

| Diámetro nominal | Flujo normal L/min. | Dimensiones en milímetros | | | | | | | | | | | | Peso Aprox. MLS | MLP E | neto kg MLFST | |
|------------------|---------------------|---------------------------|------|------|-----|-----|-----|----|-----|----|----|-----|-----|-----------------|-------|---------------|-----|
| | | M | PG | MIN | MAX | A | A' | B | B | C | E | F | G | | | | H |
| 150 | 6 | 378 | 3785 | 560 | 166 | 280 | 167 | 25 | 242 | 8 | 19 | 220 | 362 | 190 | 23 | 43 | 70 |
| 200 | 8 | 454 | 4542 | 610 | 159 | 343 | 220 | 29 | 299 | 8 | 19 | 275 | 362 | 216 | 32 | 75 | 100 |
| 250 | 10 | 567 | 5677 | 660 | 159 | 407 | 273 | 30 | 362 | 12 | 22 | 275 | 400 | 241 | 32 | 95 | 135 |
| 300 | 12 | 662 | 8516 | 710 | 159 | 486 | 325 | 32 | 432 | 12 | 22 | 275 | 438 | 267 | 34 | 125 | 180 |
| 350 | 14 | 946 | 9462 | 1065 | 106 | 535 | 378 | 35 | 476 | 12 | 25 | 430 | 712 | 305 | 68 | 222 | 320 |

A' Solamente para versión MLS (cuello soldable)

B' Solamente para versión PE (Extremos lisos)

- Su lectura es en m³
- La tolerancia es de ± 2 por ciento

9.4.2.2. Medidores tipo turbina

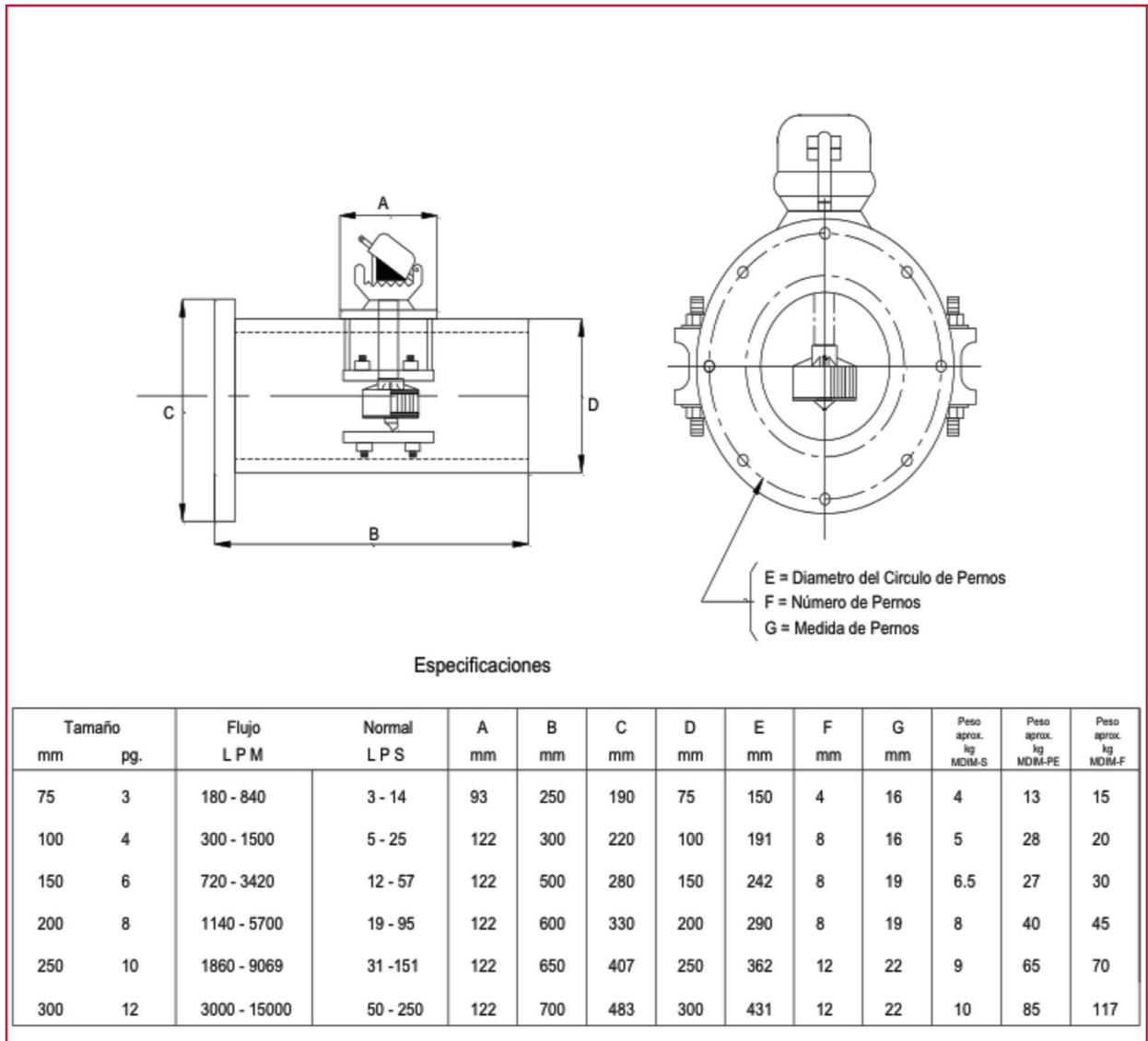
Estos medidores son recomendables en pozos que extraen agua libre de arena y que manejan presiones de trabajo de 0.73 MPa (7.5 kg/cm²) y temperaturas de hasta 65° C.

Características

- Funciona con mayor exactitud con el tubo lleno
- Su tolerancia de error es de ± 2 por ciento
- Su gasto se mide en m³
- Las pérdidas de carga son de 0.07 kg/cm²
- Son resistentes a aguas corrosivas

En la Ilustración 9.9 se muestran algunas de sus especificaciones.

Ilustración 9.9 Especificaciones de los medidores tipo turbina



9.4.3. MEDIDORES ELECTRÓNICOS

Algunos medidores de tipo hélice tienen salidas opcionales de impulsos magnéticos generados que son transmitidos hasta un receptor, el cual indica digital y gráficamente el gasto instantáneo, como se muestra en la Ilustración 9.10.

9.5. DISPOSITIVOS PARA OBSERVAR EL NIVEL DEL AGUA

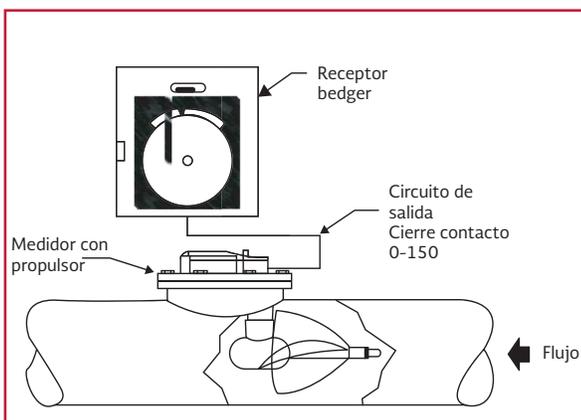
A estos dispositivos se les conoce normalmente como sondas y de acuerdo a su funcionamiento, se clasifican en:

- sondas eléctricas
- sondas neumáticas
- sondas ultrasónicas

9.5.1. SONDA ELÉCTRICA

La sonda eléctrica cuenta con un carrete donde se aloja un rollo de cable eléctrico tipo dúplex, que se introduce al pozo, y que al llegar al nivel del agua cierra un circuito eléctrico, que es detectado por un miliamperímetro instalado en el carrete (Ilustración 9.11). Tiene las siguientes características:

Ilustración 9.10 Medidor electrónico



- No requiere personal especializado para su uso
- Es un equipo portátil
- El mantenimiento es mínimo
- El cable de la sonda está marcado cada 2 m para facilitar la medición inmediata del nivel del agua

9.5.2. SONDA NEUMÁTICA

Este dispositivo consta de una manguera de 1/4" de diámetro que se introduce al interior del pozo a una profundidad mayor que el nivel dinámico del agua. En la parte superior se instala una válvula de aire, un manómetro y una bomba (Ilustración 9.12). Posteriormente se inyecta aire a presión hasta que el manómetro se establece, esta lectura se convierte a metros y se calcula la profundidad del nivel del agua.

9.5.3. SONDA ACÚSTICA

El principio de operación de este instrumento se basa en la reflexión de las ondas sonoras que son inducidas a través del espacio anular, entre los tubos de succión y de ademe, las cuales, al chocar con el nivel del agua, son reflejadas y detectadas en la superficie. Estas sondas tienen las siguientes características:

- Tiene un límite de operación de 460 m (1 500 pies)
- Tiene una exactitud de 30 cm (1 pie)
- Es factible para pozos equipados con bombas sumergibles
- Se emplean en pozos equipados con ademes de acero y PVC (Ilustración 9.13)
- No es factible usarla en pozos equipados con bomba de turbina vertical

Ilustración 9.11 Especificaciones de la sonda eléctrica

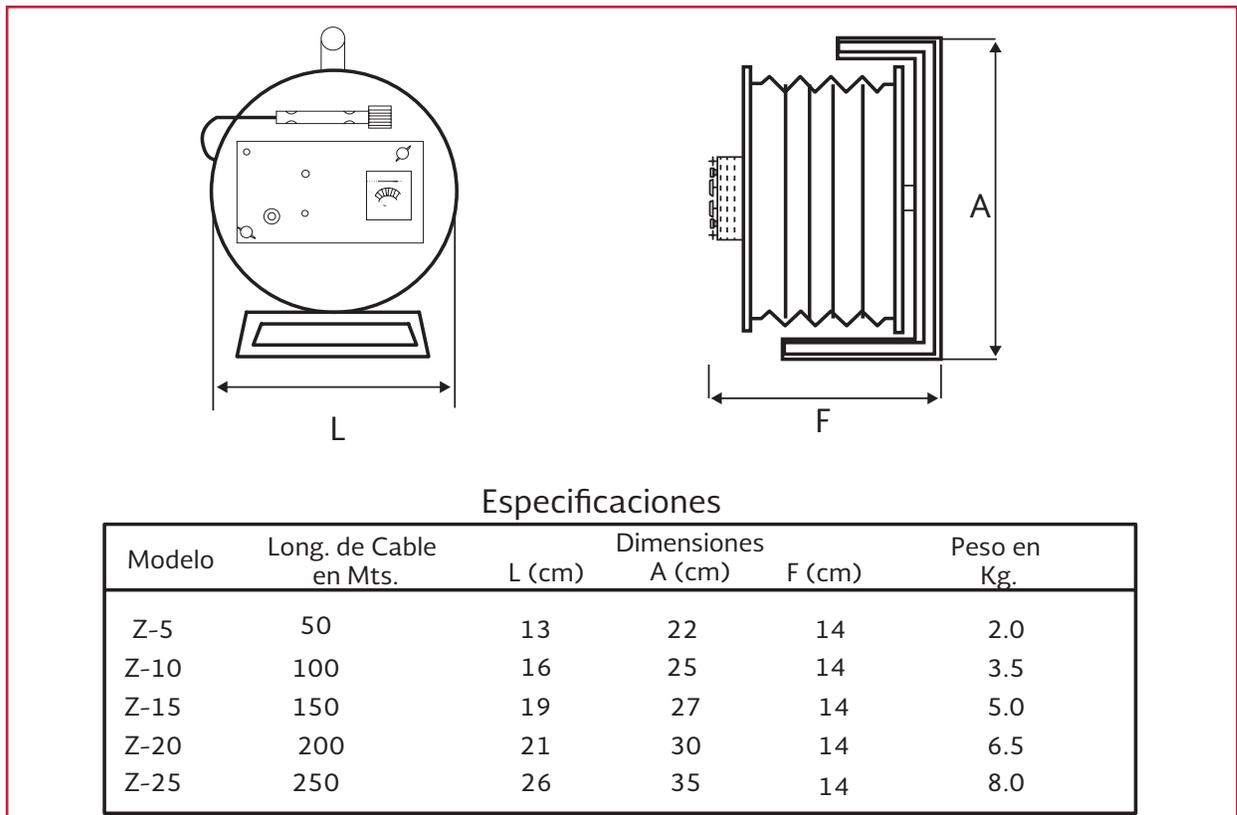
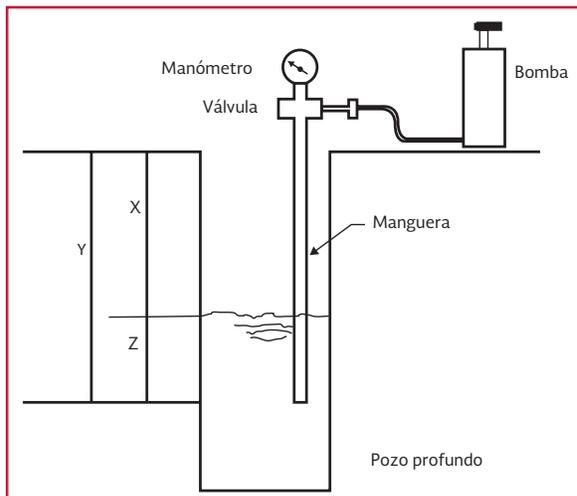


Ilustración 9.12 Funcionamiento de la sonda neumática

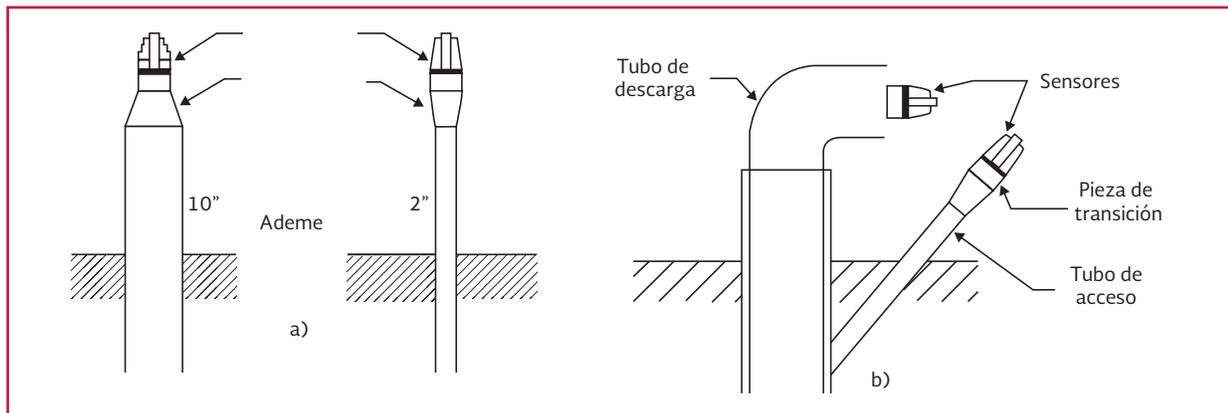


9.6. EFICIENCIA HIDRÁULICA EN LOS POZOS

La eficiencia de un sistema se define como la relación entre la energía que se le proporciona y la que se recupera de él. En el caso de un pozo de bombeo, el sistema tiene dos componentes, uno hidráulico (el conjunto pozo acuífero) y otro electromecánico (el conjunto motor bomba).

La eficiencia hidráulica (E_h) es una medida de la efectividad de un pozo para extraer agua de

Ilustración 9.13 Acoplamiento de la sonda acústica: a) en pozos de monitoreo, b) en pozos de producción



un acuífero. Cuando se opera una bomba en un pozo, se provoca un abatimiento total en el interior del mismo, que induce el flujo del agua hacia él, desde el área de influencia del bombeo.

El abatimiento total (A_t) tiene dos componentes. El primero es el abatimiento en la formación (A_f), que es la carga hidráulica necesaria para inducir el flujo del caudal extraído, en contra de la resistencia que oponen los materiales acuíferos a la circulación del agua. El segundo es la pérdida de carga (A_p) asociada con los fenómenos hidráulicos que tienen lugar en el interior y en las inmediaciones del pozo.

Se define como eficiencia del pozo a la relación entre el abatimiento teórico que es necesario provocar en la formación acuífera para extraer el caudal dado, y el abatimiento total que se mide en el interior del mismo.

$$E_h = \frac{A_f}{A_t} \quad \text{Ecuación 9.1}$$

9.6.1. FACTORES QUE CONTROLAN LA EFICIENCIA HIDRÁULICA

El abatimiento en el acuífero depende de las características naturales del mismo, que solo

pueden ser modificadas artificialmente en las inmediaciones del pozo mediante las operaciones de construcción del pozo o por los tratamientos encaminados a incrementar la permeabilidad.

Las pérdidas en el pozo dependen de sus características constructivas y pueden ser minimizadas mediante la aplicación de procedimientos constructivos adecuados, de criterios racionales de diseño y de métodos eficientes de desarrollo y limpieza. Con el tiempo, las pérdidas en el pozo pueden aumentar debido a fenómenos tales como la corrosión, la incrustación y la colmatación. Este aumento en las pérdidas hace disminuir su eficiencia.

9.6.2. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA HIDRÁULICA

La eficiencia de un pozo puede obtenerse por medio de pruebas de bombeo a caudal variable denominadas pruebas escalonadas, que consisten en varias etapas de bombeo en las que el caudal se mantiene constante.

9.7. EFICIENCIA ELECTROMECAÁNICA

La eficiencia del conjunto motor bomba se deduce comparando la curva característica del pozo (caudal versus abatimiento) con las curvas de los impulsores proporcionadas por el fabricante. En su defecto, se representa por el factor de variación de potencia (Fvp), definido como:

$$Fvp = \frac{Pt}{Pr} \quad \text{Ecuación 9.2}$$

donde:

Pt = Potencia teórica

Pr = Potencia real

A su vez, la primera está dada por la expresión:

$$Pt = 9.8 \frac{QH}{10\,000(Eb)(Em)} \quad \text{Ecuación 9.3}$$

donde:

Q = Caudal de bombeo, en L/s

H = Carga manométrica total, en m

Eb = Eficiencia de la bomba

Em = Eficiencia del motor

La eficiencia real es medida un potenciómetro.

Un Fvp menor que la unidad denota un equipo deficiente, mientras que valores mayores que uno se consideran adecuados.

El factor de potencia (Fp) se calcula aplicando la fórmula:

$$Fp = 1\,000 \frac{Pr}{1.7113IV} \quad \text{Ecuación 9.4}$$

donde:

I = Intensidad de corriente medida con un amperímetro

V = Tensión medida con un voltímetro

9.8. FENÓMENOS QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE LOS POZOS

La eficiencia y la vida útil de los pozos pueden ser substancialmente reducidas por diversos fenómenos que afectan tanto su componente hidráulica como su componente electromecánica. Para mantener la eficiencia de la captación dentro de un intervalo aceptable de valores y prolongar su vida útil, los pozos deben ser objeto de mantenimiento periódico. El mantenimiento con enfoque preventivo es preferible, porque evita que la captación se deteriore hasta el punto de requerir reparaciones mayores muy costosas.

A continuación se enumeran los fenómenos más comunes que afectan a los pozos, indicando los efectos que producen y la forma de prevenirlos o corregirlos.

9.8.1. CORROSIÓN

La corrosión consiste en la destrucción de las partes metálicas de un pozo, causada por las reacciones electroquímicas que se producen en ellas por la influencia del medio circundante. El oxígeno contenido en el agua o en el aire, que se mantiene en contacto con el metal, se transforma en óxidos que reaccionan con la estructura interna del metal y lo destruyen en forma gradual.

Efectos de la corrosión

La corrosión ataca a la tubería metálica y el cedazo es la parte más vulnerable, ya que mantiene una amplia superficie en contacto con el electrolito (agua). Debido a la destrucción parcial del cedazo, el tamaño de las ranuras aumenta y se forman oquedades en él, propiciando el acceso de la grava del filtro y del material granular propio del acuífero al interior del pozo.

Esto provoca la necesidad de azolvar el pozo, lo que a su vez provoca la consiguiente reducción de su sección de captación, el desgaste prematuro de los impulsores de la bomba, la formación de huecos a lo largo de la pared del pozo, el colapso de la tubería y, en ocasiones, la pérdida definitiva de la captación.

Factores que controlan la corrosión

La intensidad de la corrosión depende de la composición química del agua y de los elementos metálicos disueltos en ella. Algunas aguas atacan a la mayoría de los metales, mientras que otras solo son agresivas con algunos de ellos. Otros factores que influyen en el nivel de intensidad de la corrosión son: la velocidad y la temperatura del agua que corre a través del cedazo y la ocurrencia de procesos electrolíticos.

Cuando se unen dos metales en un medio electrolítico, como el agua con sales disueltas, se produce el proceso químico denominado pila galvánica, que consiste en la transferencia de iones de un metal activo a otro pasivo, con el consiguiente deterioro del material que los cede (metal activo).

Tipos de corrosión

La corrosión puede ser uniforme o localizada. La primera es causada por la acción del ambien-

te sobre una amplia superficie metálica expuesta. A causa de ella, el espesor del metal decrece y eventualmente se forman agujeros en él, las tuberías pierden resistencia y en el caso de los cedazos, el área abierta aumenta.

La corrosión localizada tiene lugar en puntos o secciones específicas. Puede ser de varios tipos:

Corrosión galvánica

Se presenta en el lugar de contacto entre dos metales de diferente potencial electronegativo, por ejemplo, entre el ademe ciego y el cedazo.

Corrosión alveolar

Originada por variaciones en la composición química de un punto a otro de un mismo metal.

Corrosión selectiva

Ataca solo uno de los componentes de una aleación y es especialmente agresiva en presencia de agua clorada.

Corrosión erosiva

Producida en secciones o áreas expuestas a desgaste mecánico por la circulación de fluidos o sólidos, como es el caso de las partes interiores de los ademes en contacto con el agua.

9.8.2. PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CORROSIÓN

Debido al grave deterioro físico que sufren las partes metálicas de las obras y en particular, de los pozos, es necesario prevenir o atenuar la corrosión

Recubrimientos anticorrosivos

Se utilizan para proteger tuberías expuestas a la corrosión en la superficie del terreno, mediante la aplicación de un recubrimiento o del galvanizado del hierro. El recubrimiento no es efectivo en presencia de agua muy ácida, que lo destruye. Tampoco es aplicable en los pozos, porque puede ser fácilmente removido durante las operaciones de construcción. En los pozos sin embargo, puede protegerse el cedazo con polietileno o con doble galvanizado.

Inhibidores de la corrosión

La corrosión puede ser evitada aplicando un inhibidor a las secciones más vulnerables a sus efectos. En los pozos, la porción más expuesta es la comprendida entre los niveles estático y dinámico del agua, porque se tienen ciclos de mojado y de secado permanentes, lo que acelera el proceso de corrosión.

Protección catódica

Este método se usa para proteger tuberías enterradas o sumergidas. Consiste en colocar a lo largo de ellas, bloques de magnesio o de zinc, unidos a la tubería mediante un cable conductor. La tubería se protege porque se invierte el flujo de electrones y el magnesio o zinc cumplen la función de metal de sacrificio, que se repone antes de consumirse por completo. El mismo efecto se consigue si se conecta la tubería al polo positivo de un generador de corriente continua. Estas dos formas de protección se han utilizado poco en pozos, pero con buenos resultados.

9.8.3. INCRUSTACIÓN

La incrustación es provocada por la precipitación de material con su consiguiente acumulación en partes de un pozo, generalmente en el cedazo, en el filtro de grava o en el material que lo circunda. El material incrustante puede ser muy variado: químico, detrítico y biológico; de consistencia dura, blanda o gelatinosa.

Efectos de la incrustación

A medida que se acumula el material incrustante, se va reduciendo el área abierta de la sección de captación del pozo. Consecuentemente, se reduce el rendimiento del mismo y aumenta la velocidad de entrada del agua, propiciando el arrastre de material detrítico a su interior y ocasionando la sobresaturación del agua, lo que provoca a su vez la precipitación de materiales.

La incrustación también puede producirse en el interior del pozo, afectando la pared interior del ademe, los impulsores de la bomba y la columna de succión. También se produce en el filtro de grava y en la porción adyacente inmediata del acuífero, cuya permeabilidad y porosidad se ven reducidas por el material incrustante.

Factores que propician la incrustación

Entre los factores que propician la ocurrencia y la intensidad de la incrustación destacan:

La presión del agua

Los pozos con fuertes pérdidas de carga están más expuestos a la incrustación, pues se incrementa con los cambios bruscos de presión.

La velocidad de entrada

El incremento de la velocidad del agua en la entrada al pozo y en su vecindad inmediata, propicia la liberación de anhídrido carbónico y con ello la precipitación de carbonatos.

La presencia de aire

En presencia de aire son más intensos algunos procesos fisicoquímicos relacionados con la incrustación. Por ello, no es conveniente que la parte superior del cedazo se encuentre en el intervalo de profundidad en que oscila el nivel freático.

Tipos de incrustación

Entre los tipos de incrustación más comunes se encuentran los siguientes:

- **Precipitación de sales.** El agua subterránea contiene sales en solución. Al ingresar el agua a un pozo, experimenta cambios bruscos de presión y de velocidad, que propician la liberación de anhídrido carbónico y la precipitación de las sales en el filtro de grava y en las ranuras del cedazo. Las sales incrustantes más frecuentes son los carbonatos, los sulfatos de calcio y de magnesio y los compuestos de hierro y manganeso
- **Acumulación de bacterias y otros microorganismos.** La llamada bacteria del hierro prolifera en los pozos cuando se combinan en el agua altos contenidos de hierro, manganeso, materia orgánica, bicarbonato y bióxido de carbono. Los depósitos de este tipo obstruyen y destruyen rápidamente los cedazos de los pozos

- **Depósito de materiales finos.** Los detritos finos acarreados por el agua, limos y arcillas, también contribuyen a obstruir el cedazo (colmatación). Combinados con los materiales señalados en los incisos anteriores, incrementan la intensidad de la incrustación

9.8.4. PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA INCRUSTACIÓN

A pesar de que en algunas zonas la composición química del agua subterránea favorece la incrustación de los pozos, este fenómeno puede prevenirse o retardarse aplicando las medidas que se describen a continuación.

Utilización de tubería de PVC

Esto impide la incrustación en las tuberías, aunque puede producirse en otras partes del pozo, como en el filtro de grava y en las partes metálicas de la bomba.

Diseño adecuado del pozo

De acuerdo al tipo de pozo, la velocidad de entrada no debe exceder los valores permisibles. Hay que asegurarse que la parte superior del cedazo no quede temporal o permanentemente en la zona de aireación y que la granulometría del filtro de grava y la abertura de las ranuras sean compatibles con la granulometría de los materiales acuíferos.

Desarrollo eficiente

Con el fin de remover los materiales finos del acuífero en la vecindad inmediata, se debe incrementar la permeabilidad del medio y con ello reducir la velocidad de ingreso.

Cloración del agua

La cloración debe realizarse durante la construcción o la rehabilitación del pozo. Con ella se puede evitar la proliferación de la bacteria del hierro. Una concentración de 50 ppm de cloro activo y la adición periódica de cloro, suelen ser suficientes para tal fin.

Si el pozo ya está afectado por la incrustación, el daño puede corregirse mediante tratamientos químicos y mecánicos, consistentes en la adición de ácidos y en operaciones de limpieza encaminadas a remover los materiales incrustantes.

El tratamiento más común para eliminar la incrustación de carbonatos, consiste en la aplicación de ácidos, como el muriático y el sulfámico. El primero se aplica en concentraciones que van de 25 a 30 por ciento, y el segundo, de 15 a 20

por ciento. Generalmente se agrega un anticorrosivo de metales para proteger el ademe.

La incrustación bacteriana puede corregirse por medio de la aplicación de cloro, en forma de hipoclorito cálcico o sódico, en estado puro o disuelto en agua. La concentración requerida de cloro activo es de 100 a 500 ppm. Es importante no rebasar la concentración máxima, ya que el cloro es un elemento muy agresivo para las partes metálicas de la captación.

Para evaluar el riesgo de corrosión o de incrustación y para aplicar medidas preventivas en contra de sus efectos, es necesario obtener información de las características fisicoquímicas del agua subterránea en la zona de interés. Así, por ejemplo, el riesgo aumenta con el contenido de sales, en particular, en presencia de aguas bicarbonatadas (cálcicas o magnésicas) y con alto contenido de hierro.



10

REHABILITACIÓN DE POZOS Y EQUIPO DE BOMBEO

10.1. DIAGNÓSTICO DEL POZO

Con el objeto de analizar el estado físico de un pozo, es necesario contar con una serie de datos que indiquen la historia de su operación, así como la evolución y el comportamiento del acuífero en donde está emplazado. Para obtener la información necesaria en un diagnóstico realista, se deben realizar las siguientes tareas:

- Se hace una prueba de bombeo de corta duración con el equipo instalado, a fin de obtener información sobre el máximo caudal de extracción, de los niveles estático y dinámico, de la presión y de la carga dinámica total para calcular el caudal o el rendimiento específico del equipo de bombeo, midiendo además los parámetros eléctricos del equipo, como el amperaje, el voltaje, la corriente consumida en kW/h, comparándola con la corriente demandada al inicio de la operación. De esta manera se puede analizar en forma preliminar la eficiencia con la que está funcionando el equipo de bombeo
- Posteriormente se desacopla el equipo de bombeo para hacer una revisión general.

Se observa el posible desgaste de los impulsores del cuerpo de bombeo, de las flechas, chumaceras, tazones de descarga y de succión, así como del motor y del cable submarino, en el caso de que se trate de una bomba sumergible

- Para determinar sus características, los pozos se deben sondear e incluso correr registros de video, con el fin de conocer su profundidad, la longitud de la rejilla y el ademe. Con ello se establece su estado actual. Se debe observar a detalle si la rejilla o el ademe del pozo están en buenas condiciones, si hay incrustación, corrosión o algún colapso o abertura por donde pudiera estarse dando la aportación de materiales finos hacia el pozo

El aumento en los registros mensuales del consumo de energía sin una modificación en el caudal de extracción significa que hay algún problema, ya sea en el pozo o en el equipo de bombeo.

Para evaluar la eficiencia de un acuífero o de un pozo y su equipo de bombeo, ya sea en el sistema completo o en la bomba en particular, se emplean una serie de parámetros y ecuaciones, que combinan en conjunto aspectos hidráulicos y mecánicos.

Cuando se presenta una disminución del caudal de operación original, es conveniente hacer una revisión de los análisis químicos del agua para determinar si esta disminución se debe o no, a la incrustación o la corrosión en la rejilla o a la invasión de arenas y gravas.

Siempre se incluye en el diagnóstico la presencia y evolución de metales pesados y pesticidas, ya que en concentraciones elevadas pueden provocar males irreversibles al ser humano.

10.2. TRATAMIENTO DE POZOS

Se utilizan varios métodos de tratamiento para rehabilitar pozos, cada uno de acuerdo a problemas específicos. Los más usuales son: la aplicación de ácidos desincrustantes, el desazolve del pozo, el cepillado del ademe, el pistoneo del pozo y la aplicación de aire comprimido a alta presión.

10.2.1. APLICACIÓN DE ÁCIDOS Y ELEMENTOS DESINCRUSTANTES

Algunos de los ácidos de mayor aplicación se muestran en la Tabla 10.1.

Tabla 10.1 Compuestos desincrustantes

| Tratamiento | Concentración | Aplicación |
|-----------------------------|---|---|
| Ácido muriático | 25 a 30 % | Disuelve los carbonatos de calcio y magnesio |
| Ácido sulfámico | 15 a 20 % | Disuelve los carbonatos de calcio y magnesio |
| Cloro (hipoclorito cálcico) | 100 a 200 ppm | Destruye las bacterias de hierro |
| Polifosfatos | 0.98 a 4.9 MPa (10 a 50 kg/m ³) | Desprende y dispersa los materiales incrustantes (carbonatos y bacterias de hierro) |

10.2.2. DESAZOLVE DEL POZO

El pozo se desazolva empleando la maquinaria usada en la perforación por percusión con cable y herramienta, primero aflojando el material producto del azolve y después extrayéndolo hacia la superficie por medio de la cubeta o la cuchara. Se extrae material hasta desazolvar el volumen calculado, de acuerdo a la profundidad original del pozo más el abudamiento que se cause con esta maniobra.

Nunca se deben llevar a cabo trabajos de desazolve por medio de máquina rotaria, ya que el uso de lodos y la presencia de grava en el espacio anular provocarían una mezcla cementante con la consecuente obstrucción de los espesores del acuífero aprovechables dentro del pozo.

De igual forma, el desazolve se puede efectuar mediante sifoneo, usando un compresor de alta presión de 1.72 MPa (17.52 kg/cm²) y 1.7 m³/min (250 libras por pulgada cuadrada y 600 pies cúbicos por minuto), con una línea de doble tubería, una interior o exterior de 2.54 cm (1") de diámetro y una tubería principal de 7.84 cm (3") de diámetro, con una longitud suficiente o igual a la profundidad original del pozo. La extracción del material de azolve se realiza mediante la inyección de aire por la línea interior

o exterior y el retorno del material producto del azolve por la línea principal. Este procedimiento es muy efectivo y sobre todo, ayuda en la limpieza del espacio anular del pozo.

10.2.3. CEPILLADO AL ADEME DEL POZO

El cepillado se realiza una vez que se ha detectado por medio de análisis químicos y videograbación que la causa de disminución del caudal es la incrustación que se ha originado en el transcurso de la operación del mismo. Para ejecutar esta maniobra, se adapta un cepillo de alambre al barretón, de diámetro similar al ademe o rejilla. Enseguida se inicia el cepillado en forma descendente a partir de la profundidad donde comienza la rejilla y hasta la profundidad total de la misma. Posteriormente se debe aplicar ácido muriático o sulfámico como diluyente de los materiales incrustantes.

10.2.4. PISTONEO DEL POZO

Para preparar el pistoneo del pozo se debe aplicar un dispersor de arcillas en una proporción de 20 litros por cada 30 m de profundidad, a partir del nivel estático. Se deja reposar durante 24 horas, a fin de lograr la acción dispersante de las moléculas que componen las arcillas. Posteriormente se prepara el pistón que va conectado a la herramienta y que debe tener un diámetro sensiblemente menor al del ademe o de la rejilla, aproximadamente entre 1.25 cm y 2.54 cm ($\frac{1}{2}$ "-1").

La acción del pistoneo se inicia a la profundidad en la que inicia la rejilla y se avanza en forma descendente hasta la profundidad total del pozo. Una vez que se ha cepillado y pistoneado el pozo,

se realizan los trabajos para desazolvarlo, tal y como se indicó en el inciso 10.2.2.

10.2.5. APLICACIÓN DE AIRE PARA SUSTITUCIÓN DE ARENA POR GRAVA

Hay pozos que durante su régimen de operación han estado aportando arenas y materiales finos que provocan desgaste continuo a las partes del cuerpo de la bomba y acumulación de azolve en el interior del pozo. Con el fin de tratar de solucionar este problema y darle al pozo una vida útil más larga y con mejores condiciones de operación, se sustituyen los tramos que permanecieron sin grava durante su construcción y en los que no se ha logrado formar un filtro natural.

Se utiliza un compresor de 1.72 MPa (17.52 kg/cm²) y 1.7 m³/min (250 libras por pulgada cuadrada y 600 pies cúbicos por minuto) con una línea de aire capaz de vencer la columna de agua. Se aplica la inyección de aire a la cámara cerrada con una tubería de descarga y su respectiva válvula de paso, a fin de que, en forma intermitente, se logren descargas y pérdidas de presión que provoquen la salida de material fino y el desplazamiento vertical de la grava en el espacio anular.

De esta manera puede lograrse una continua substitución de grava por arena en el espacio anular y rehabilitar el pozo arenoso, con una operación normal y sin aportación significativa de materiales finos.

Se puede decir que todos los procesos para el tratamiento de pozos tienden a mejorar su capacidad, independientemente de las condiciones hidrológicas del acuífero en explotación. Los re-

sultados que se obtienen pueden variar notablemente en cada caso, pero los más importantes pueden ser los siguientes:

- Aumentan la permeabilidad en el entorno del pozo, generando una mayor capacidad específica
- Estabilizan la unidad geológica en torno al pozo, con lo que se disminuye la posibilidad de bombear arena
- Si en la construcción del pozo se empleó lodo de perforación, pudo no haberse hecho una limpieza adecuada (desarrollo) por lo que permanece la capa de enjarre en la pared del pozo. Con el tratamiento aplicado se dispersa el lodo, dejando libre la entrada del agua
- Con el tratamiento se aumenta la permeabilidad de la formación en la vecindad del pozo, lo que provoca que la velocidad de entrada del agua sea menor. Esto retrasa la acción incrustante o corrosiva del agua
- En acuíferos en rocas fracturadas, el tratamiento elimina los materiales finos que rellenan las fracturas, permitiendo así un paso más franco del agua al pozo
- Con estos tratamientos es común que en algunos pozos se favorezca la creación de un filtro natural con los materiales del acuífero, sobre todo si el ademe o la rejilla instalada es adecuada

10.3. ENCAMISADO DE POZOS

Los problemas que se pretenden resolver con esta medida son:

- Aportación de grava o material de las paredes de la formación por causa de algunos tramos del ademe atacados por corrosión
- Colapso de tramos de la rejilla o ademe por mala aplicación de la soldadura al unir los tramos de la rejilla o ademe
- Persistencia de aportación de materiales finos en determinados tramos de la rejilla

El encamisado puede ser total o parcial, de acuerdo al número de tramos dañados en la longitud del ademe. Si son varios los tramos del ademe que muestran daño o en los que se da la aportación de materiales finos, es conveniente pensar en la colocación de un casquillo o una camisa en toda la longitud del ademe, con un diámetro nominal que será el inmediato inferior al del ademe. La abertura de la rejilla será de un milímetro, a fin de favorecer la formación de un filtro natural, con la única desventaja que disminuye el diámetro de la cámara de bombeo.

En caso de que los tramos dañados sean pocos, es posible colocar camisas de tres metros de longitud, de fierro, acanaladas y con un espesor de 1/16" en diámetros nominales.

Una vez que se ha identificado correctamente el tramo a reparar, se baja una prensa electrohidráulica hasta la profundidad del tramo. La prensa presiona la zona del ademe cuando está colapsada. Si no hay colapso, se baja inmediatamente el tramo de camisa de diámetro inferior al ademe con la prensa a la misma profundidad.

La prensa presiona a la camisa contra el ademe, formando así una camisa de refuerzo de fierro so-

bre el tramo dañado, sin disminuir virtualmente el diámetro de la cámara de bombeo.

La ventaja de este método es la rápida colocación de la camisa, ya sea completa o por tramos, en forma ascendente, tanto en la cámara de bombeo como en cualquier tramo del pozo.

10.4. REPARACIÓN DEL EQUIPO ELECTROMECAÁNICO

10.4.1. REVISIÓN DEL EQUIPO DE BOMBEO

La primera parte del equipo de bombeo que debe revisarse es el cuerpo de tazones, determinando el nivel de desgaste y de incrustación que presentan los impulsores, ya sea debido al uso, a la acción abrasiva de los materiales finos, a la corrosión o a la acción de la cavitación generada por la expulsión de la mezcla aire agua.

Por lo tanto, se deben anotar todos los datos disponibles (el fabricante, el modelo, la eficiencia de diseño y el número de impulsores) para que, en caso necesario, se repare o se restituya, de acuerdo con las características del nuevo diseño de operación de la fuente de abastecimiento rehabilitada. La reparación del cuerpo de tazones consiste en la rectificación de los asientos de los tazones y de los impulsores, cambiando los bujes, sellos y seguros, enderezando o cambiando la flecha de los tazones, procurando que al ensamblar nuevamente el cuerpo de tazones se verifique el juego axial de los impulsores.

10.4.2. REVISIÓN DE COLUMNAS Y TRANSMISIÓN ELECTROMOTRIZ

En segundo término, cuando se trata de una bomba vertical, se revisan todos los tramos de flechas, camisas o chumaceras que integran la transmisión electromotriz, a fin de reparar o sustituir estos componentes, de acuerdo a las especificaciones técnicas establecidas que aseguren la operación continua y sistemática del equipo. Si se trata de una bomba sumergible, se revisa el cable eléctrico y se sustituye el tramo dañado o todo el cable según sea necesario. Se revisan también los tramos de tubos de la columna de bombeo, cuidando que no tengan algún ataque de corrosión ocasionado por la calidad del agua.

10.4.3. REVISIÓN DEL MOTOR ELÉCTRICO

Mediante una revisión exhaustiva del motor eléctrico, que forma parte de la fuente de energía del sistema de bombeo, se verifica el estado de sus componentes eléctricos y mecánicos, para diagnosticar si hay necesidad de repararlos o sustituirlos. Se revisa el estopero y el funcionamiento adecuado de su sistema de lubricación, ya sea por aceite o por agua. Si el motor es sumergible, se embobina del rotor, se rectifica su flecha, se cambian los bujes, los sellos y el disco de rangua y la chumacera. Si el motor es vertical, de flecha hueca para bomba turbina, se embobina el rotor, se cambian los baleros de carga y de guía, se rectifica la flecha del rotor, se

barnizan los devanados del estator y se cambia el aceite.

10.4.4. REVISIÓN DEL TRANSFORMADOR

Se revisa minuciosamente el funcionamiento eléctrico del transformador, sus niveles y la calidad del aceite. De igual manera, se determina el estado del arrancador y del interruptor termomagnético. Se verifican y revisan el voltaje, el amperaje y el estado general de todos sus componentes. Si se observa que el transformador está sucio y húmedo, se le saca el aceite y se pone a secar en un horno especial para eliminar

la humedad, filtrándolo para volver a utilizarlo. En caso contrario, se sustituye todo el aceite dieléctrico. También debe contemplarse si hay necesidad de efectuar un embobinado general del transformador.

10.4.5. REVISIÓN DEL ARRANCADOR

Finalmente, hay que verificar si el arrancador necesita embobinado del autotransformador, así como cambio de conectores, de contactos fijos y móviles, de contactos auxiliares y del relevador de sobrecarga. En la subestación puede ser necesario el cambio del apartarrayos y de los fusibles en las cuchillas y canillas.

11

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CAPTACIONES ESPECIALES

11.1. GALERÍAS FILTRANTES

11.1.1. DESCRIPCIÓN

Las galerías filtrantes son captaciones horizontales o casi horizontales tipo túnel, de pequeñas dimensiones, que fueron muy populares hasta que la construcción de los grandes pozos, con equipos de perforación de pozos profundos, se popularizó.

Su construcción puede requerir, desde el uso de pico y pala en materiales suaves con el eventual empleo de ademes si las paredes de la excavación no se sostienen por sí mismas, hasta la barrenación con pistolas de aire comprimido y el uso de explosivos.

Durante la construcción del pozo debe tenerse mucho cuidado en la ventilación de la excavación, por los gases que generan los explosivos y por los que pueden encontrarse en las formaciones geológicas (metano y otros), algunos de los cuales pueden ser letales.

Su profundidad es variable y oscila de los 6 hasta los 70 m. Las grandes profundidades suelen ser incosteables. En su construcción se emplean

materiales de larga duración, como arcillas vitrificadas, concreto, ladrillos cocidos y planchas o placas de fierro. Su diámetro suele variar entre los 60 cm y 1.5 m. Los registros de visita en intervalos de pocos metros facilitan la inspección y el mantenimiento.

La velocidad que alcanza el agua raramente excede los 7 m/s y su rendimiento varía ampliamente de acuerdo a las condiciones locales. Suele ser común una filtración media de 25 a 100 L/s en galerías de más de 30 m de longitud.

Actualmente se construyen galerías filtrantes colocando en el fondo de una zanja tubería de PVC de cédula 80, con ranuración de fábrica de 0.5 a 2.0 mm y cubriendo toda la obra con grava graduada de 1/6" a 1/7" de diámetro.

Para analizar el flujo transitorio que fluye hacia las galerías filtrantes, se pueden aplicar las soluciones que describen el comportamiento hidráulico de zanjas totalmente penetrantes, con caudal constante por unidad de longitud, o con abatimiento constante (flujo unidimensional, normal a la zanja). En el primer caso, la ecuación aplicable es:

$$a = \frac{Qx}{2t} [D(u)q] \quad \text{Ecuación 11.1}$$

donde:

- a = Abatimiento total en la galería
- x = Distancia normal al eje de la galería
- Q = Caudal
- $D(u)q$ = Función de drenado a caudal constante
- t = Tiempo

En el segundo caso, se aplica la ecuación siguiente:

$$a = a_0 [D(u)h] \quad \text{Ecuación 11.2}$$

donde:

- a = Abatimiento total en la galería
- a_0 = Abatimiento constante en la galería a partir del tiempo cero
- $D(u)h$ = Función de drenado a carga constante

11.1.2. USOS COMUNES

11.1.2.1. Mejoramiento de la captación de manantiales

Si el gasto de un manantial ha disminuido debido al abatimiento de los niveles freáticos o piezométricos, cabe la posibilidad de captar estratos con mayor carga hidráulica. Cuando la descarga se da por fisuras, se puede intentar interceptar un mayor número de ellas, concentrando en un solo punto varias descargas del mismo frente.

11.1.2.2. Captación de acuíferos delgados de alta permeabilidad

Cuando el espesor saturado de un acuífero es pequeño, el gasto y el rendimiento de los pozos

puede ser bajo. Resulta más conveniente entonces construir una galería para aprovechar la capacidad transmisora en sentido horizontal.

11.1.2.3. Captación en acuíferos de permeabilidad baja

Este caso es similar al anterior. La baja transmisividad del acuífero es compensada con la galería, aumentando la longitud de captación en sentido horizontal.

11.1.2.4. Captación de vetas permeables

Estas estructuras geológicas pueden aflorar en un frente rocoso, similar a una explotación minera. La galería se construye siguiendo la zona permeable hasta alcanzar la zona de saturación.

11.1.2.5. Acuíferos limitados verticalmente

Estos aprovechamientos pueden estar limitados por estructuras geológicas de tipo dique, que son impermeables al frente de una formación rocosa. Es un caso similar al anterior (Ilustración 11.1).

Con excepción de los acuíferos delgados de alta permeabilidad y de los acuíferos de baja transmisividad, en los acuíferos restantes se requiere de un conocimiento detallado de la geología local, especialmente en sus aspectos estructurales, para el diseño de la captación horizontal. En general, para la construcción de cualquier tipo de galería filtrante conviene contar con personal experimentado en excavaciones mineras subterráneas.

11.2. ZANJAS

11.2.1. DESCRIPCIÓN

Las zanjas son excavaciones someras de gran longitud que pueden utilizarse cuando se tienen niveles freáticos próximos a la superficie del terreno.

Su construcción es una solución local, por ejemplo, en acuíferos freáticos de poco espesor, limitados inferiormente por roca impermeable. En las zanjas deben extremarse precauciones para evitar la contaminación del agua, alojando el tubo ranurado, para la captación y la conducción del agua, casi en el fondo de la zanja, en una matriz de arena y grava, cubierta hasta la superficie por un relleno arcilloso (Ilustración 11.2).

Desde el punto de vista hidráulico, para el diseño de zanjas son aplicables los conceptos empleados en la sección de galerías filtrantes.

En cuanto a los taludes de la excavación, deben ser adecuados para que se mantengan estables

mientras la zanja permanece abierta y se diseñan empleando criterios geotécnicos.

Su construcción se lleva a cabo mediante el empleo de una zanjadora con el eventual auxilio de un diente rompedor jalado por un tractor de orugas, siempre que los materiales por excavar sean atacables. Esto es factible siempre y cuando el transporte del equipo no resulte prohibitivo. De lo contrario puede excavar con el uso de explosivos.

11.2.2. USOS COMUNES DE LAS ZANJAS

Las zanjas se usan principalmente en el drenado de tramos de carreteras y de terrenos agrícolas. Es raro su empleo en la captación de aguas subterráneas por la facilidad de ocasionar contaminación desde la superficie del terreno. Pero, considerando las medidas adecuadas de protección sanitaria, se pueden usar en la captación de acuíferos freáticos de poco espesor y próximos a la superficie del terreno.

Ilustración 11.1 Esquema típico de una galería filtrante

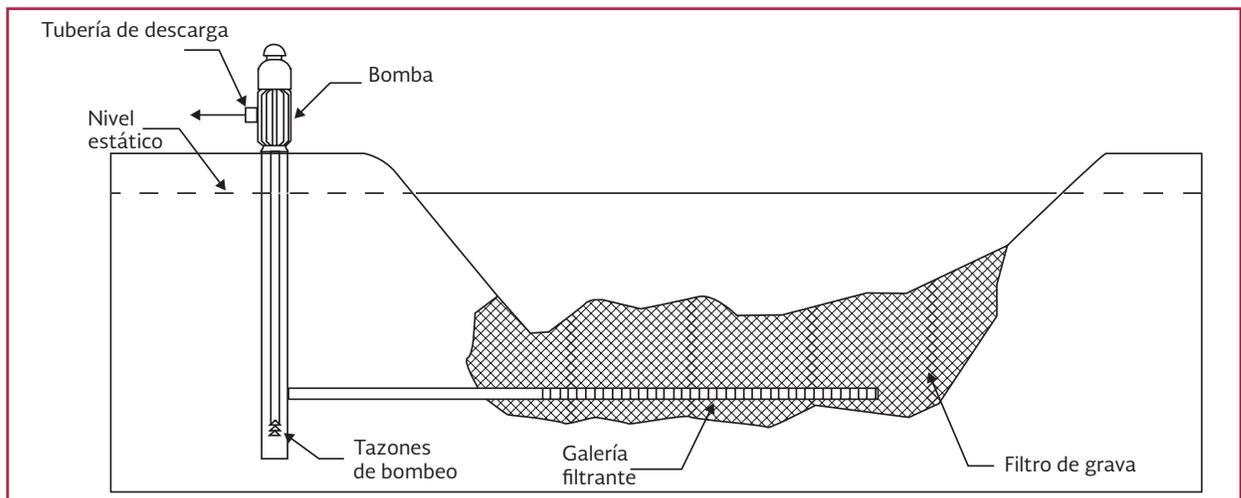
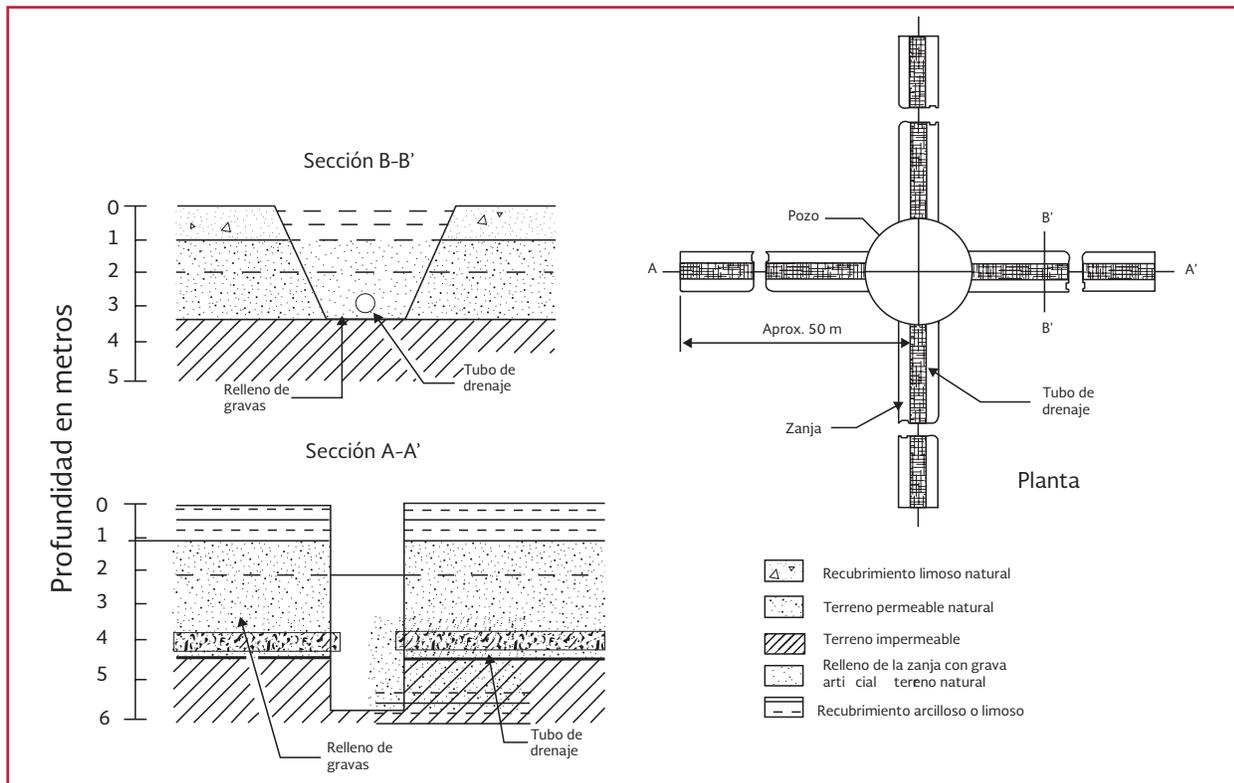


Ilustración 11.2 Elementos de una Zanja



11.3. POZOS RADIALES

11.3.1. ELEMENTOS DEL POZO RADIAL

Los pozos radiales son captaciones horizontales, como las galerías filtrantes, que cuentan con una cámara vertical o cárcamo, de la cual parten varios colectores horizontales. La cámara es de concreto reforzado, de forma circular, con diámetro interior de 1.5 a 4.5 m y de la profundidad necesaria para alcanzar los acuíferos que se desean captar. En el cárcamo se instalan los equipos de bombeo (Ilustración 11.3 e Ilustración 11.4)

De la cámara parten los colectores radiales, perforados horizontalmente a la profundidad prefijada, los que constituyen la sección de captación de la obra. Dependiendo de las características

del acuífero y del caudal requerido, su número suele variar entre 4 y 20. Su diámetro varía entre 0.15 y 0.5 m y su longitud entre 15 y 100 metros.

Con estos elementos se logra una gran superficie de captación, aun en acuíferos delgados, que puede dar al pozo una capacidad para bombear de 200 a 1 000 L/s. Como una regla empírica, válida para estimaciones preliminares, puede suponerse una capacidad de extracción de un litro por segundo por metro de colector.

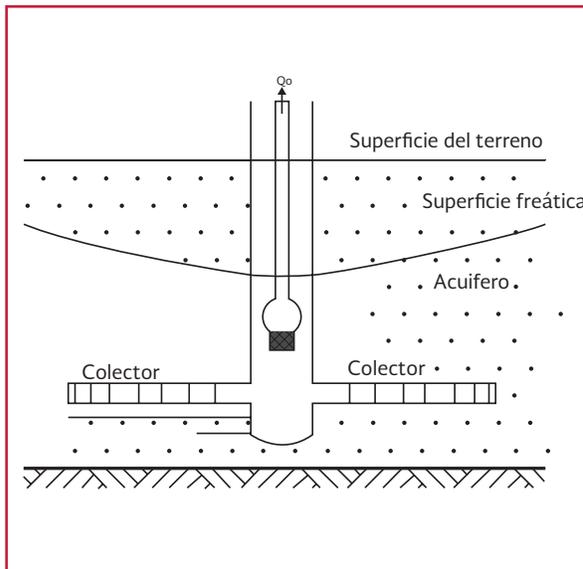
11.3.2. CONSIDERACIONES DEL POZO RADIAL

En ciertas condiciones geohidrológicas, los pozos colectores radiales tienen ventajas técnicas sobre los pozos verticales para grandes

Ilustración 11.3 Parte superficial de un pozo radial



Ilustración 11.4 Elementos hidráulicos de un pozo radial



capacidades instaladas (mayores de 200 L/s.). Sin embargo, para capacidades menores pueden no ser una opción conveniente, por su elevado costo. Para decidir qué tipo de captación es más conveniente, se deben analizar los factores técnicos y los económicos.

Ventajas del pozo radial

- Permite captar acuíferos localizados a varias decenas de metros de la superficie del terreno gracias a su procedimiento constructivo

- Es especialmente adecuado para explotar acuíferos de gran permeabilidad, que son profundos para ser captados mediante galerías filtrantes y de poco espesor para ser captados con pozos verticales
- Puede extraer caudales importantes de agua de un acuífero delgado y permeable, en lugar de construir varios pozos verticales
- Su bombeo concentrado tiene un costo menor al costo de un bombeo distribuido en varios pozos verticales, que requiere de la instalación de diversas bombas, de su interconexión para colectar el caudal, de mayor espacio y de mayores costos de mantenimiento y operación
- En la captación de acuíferos libres no se reduce su área de filtración al abatirse la superficie freática, evitando así el riesgo de arrastre de material, el azolve y el aumento del costo de la energía
- Debido a que su sección de captación está ampliamente distribuida en el área, se evitan los fuertes abatimientos locales que provoca el bombeo puntual. Por eso son recomendables para captar acuíferos de poco espesor, que sobreyacen a masas

de agua salobre o salada, como ocurre en las fajas costeras

- Se utiliza para prevenir la captación de acuíferos someros contaminados, mediante colectores instalados a mayor profundidad. Así se evita la captación de aguas contaminadas o, al menos, se aumenta el recorrido del agua en el subsuelo a través de los materiales granulares, con lo cual se propicia la remoción de contaminantes, especialmente biológicos (Ilustración 11.5)

Desventajas del pozo radial

- Alto costo de construcción
- Complejo procedimiento constructivo
- Aplicable solamente para captar acuíferos a profundidades no mayores de 50 m

11.3.3. ESTUDIOS PRELIMINARES EN POZOS RADIALES

El pozo radial tiene un alto costo de construcción y por tanto, representa una inversión que debe sustentarse en una amplia in-

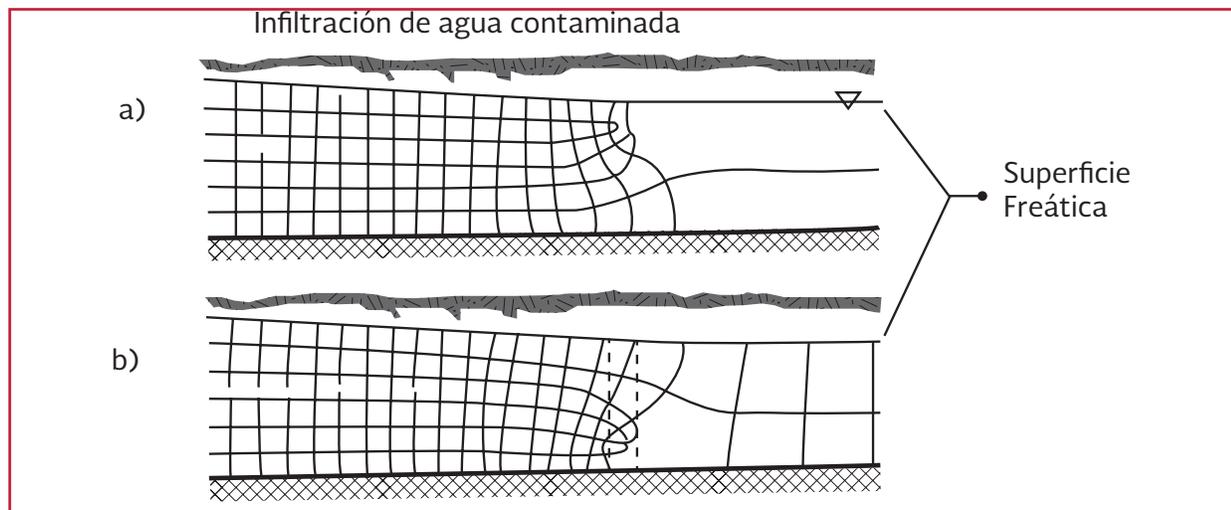
vestigación geohidrológica que demuestre su factibilidad técnica y económica.

Para que se puedan operar permanentemente o durante largos intervalos de tiempo, se requiere que la recarga de los acuíferos sea de magnitud igual o mayor que la capacidad de extracción de la captación. Por esta razón, es frecuente que sean construidos en las inmediaciones de corrientes superficiales, que pueden inducir la infiltración de la totalidad o de una fracción del caudal extraído.

Para definir el emplazamiento y hacer el diseño de los pozos radiales se debe:

- Excavar pozos exploratorios y practicar sondeos geofísicos para conocer la localización, extensión y características de los acuíferos y los acuitardos
- Contar con el análisis hidrométrico de la corriente superficial en el sitio del proyecto y la estimación de la capacidad de infiltración de su cauce
- Ejecutar pruebas de bombeo de larga duración, con piezómetro, para evaluar las

Ilustración 11.5 Ubicación vertical de colectores para prevenir captación de agua contaminada a) El colector somero capta agua contaminada b) El colector profundo extrae agua de mejor calidad



propiedades hidrodinámicas M del acuífero, identificar su interconexión con la corriente superficial y evaluar la magnitud de la recarga que puede inducirse desde aquella. En estos casos, la conexión de los acuíferos con el río debe ser estudiada previamente, ya que la presencia de horizontes de baja permeabilidad (arcillas) entre ambos puede reducir el ritmo de recarga

- Practicar el muestreo y hacer el análisis de laboratorio del agua superficial y subterránea, para determinar sus características fisicoquímicas y bacteriológicas

11.3.4. DISEÑO DE POZOS RADIALES

Con base en los estudios previos, una vez definido el emplazamiento del pozo radial, se procede al diseño de sus componentes: la cámara de bombeo y la sección de captación.

El diseño hidráulico de la cámara debe considerar esencialmente dos factores, la profundidad y el diámetro de la toma, recordando siempre que ambos tienen una influencia determinante en el alto costo de la obra y en la dificultad del proceso constructivo. La profundidad depende de la

posición de los acuíferos que se pretenden captar y de consideraciones que toman en cuenta la recarga local y la calidad del agua. En general, su valor no es mayor de 50 metros.

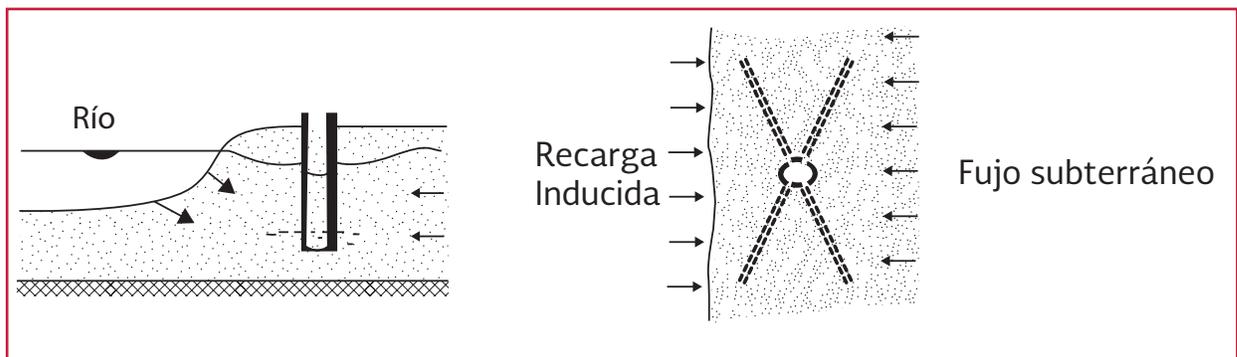
Por otra parte, el diámetro del cárcamo debe ser suficiente para alojar los equipos de bombeo de la capacidad deseada y las instalaciones conexas, así como para facilitar las maniobras de construcción y de mantenimiento. Su tamaño depende de la capacidad de bombeo requerida y puede llegar a ser de 4 a 5 metros.

Para diseñar las características de los colectores a partir del muestreo controlado del material extraído durante el hincado de los colectores, se puede formar un corte horizontal de la formación. Con base en el análisis granulométrico, se define la abertura adecuada de las ranuras. Lo más recomendable es utilizar cedazos de tipo helicoidal, aunque también puede instalarse una tubería ranurada convencional.

Una vez seleccionados el tipo de tubería y la abertura de las ranuras, del catálogo del fabricante se obtiene el área de infiltración por unidad de longitud para diferentes diámetros.

El área total de infiltración del pozo radial está dada por:

Ilustración 11.6 Captación indirecta de corrientes superficiales



$$A = n\pi dLr \quad \text{Ecuación 11.3}$$

donde:

A = Área total de infiltración

n = Número de colectores

Lr = Longitud ranurada

d = Diámetro de la tubería

La velocidad máxima de entrada (V_{max}), se calcula por medio de la expresión:

$$V_{max} = \sqrt{\frac{K}{30}} \text{ o } \sqrt{\frac{K}{60}} \quad \text{Ecuación 11.4}$$

donde:

K = Coeficiente de permeabilidad (m/s)

A partir de las Ecuaciones 11.3 y 11.4 y considerando la capacidad del pozo radial (Q_o), se llega al criterio de diseño:

$$\frac{Q_o}{[n\pi dLr]} < \sqrt{\frac{K}{60}} \quad \text{Ecuación 11.5}$$

Si se fija el valor de Q_o y el valor de K se deduce mediante pruebas de bombeo o se estima a partir de la granulometría del acuífero. La Ecuación 11.5 permite calcular el número necesario de colectores para diferentes combinaciones de diámetro de tubería y de longitud ranurada.

Como restricción adicional, se recomienda que la velocidad máxima de flujo en los colectores se encuentre dentro del intervalo 0.75 a 1.0 m/s (Ecuación 11.6).

$$0.75 \frac{m}{s} < \left[V = \frac{Q_o}{n\pi d^2} \right] < 1 \frac{m}{s}$$

$$\text{Ecuación 11.6}$$

La elección final de las tuberías y ranuras se debe basar en un análisis comparativo que tome en cuenta aspectos económicos y constructivos.

Finalmente, el abatimiento aproximado del nivel de agua en el interior del pozo radial se calcula por medio de la expresión siguiente:

$$a = \frac{Q}{2\pi KH} Lr \left(\frac{R}{re} \right) \quad \text{Ecuación 11.7}$$

donde:

a = Abatimiento

Q = Caudal

H = Profundidad del nivel estático

K = Coeficiente de permeabilidad

R = Radio de influencia del bombeo

re = Radio efectivo del pozo

Lr = Longitud ranurada

11.3.5. MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN DE POZOS RADIALES

Aun cuando este tipo de pozos no son adecuados para ser instalados en sitios en roca, ni en clásticos gruesos, si se excavan en roca densa y sana, la cámara y los colectores no requieren ser ademados. Pueden construirse con el método rotatorio hidráulico, aunque el avance suele ser lento. La perforación de tiros verticales en roca se ha desarrollado en el campo de la geotecnia y minería. La principal dificultad en la perforación estriba en la colocación de los colectores, que deben ser entubados conforme progresa su perforación.

La técnica de perforación más utilizada fue desarrollada por Leo Ranney, en

1934, quien construyó un pozo radial para abastecer de agua a la ciudad de Londres. Desde entonces, este tipo de captaciones también reciben el nombre de pozos Ranney. Este método es aplicable en horizontes de sedimentos de grano medio a grueso y es el más adecuado cuando los acuíferos no contienen aguas corrosivas.

La cámara es excavada mediante herramientas que pueden operarse bajo el agua. Para vencer la fricción del terreno se utiliza el peso propio del cilindro o gatos hidráulicos. En ocasiones, a la parte inferior del cilindro se le da forma cónica. La cámara siempre es de concreto reforzado, ya sea monolítico (cimbrado en sitio) o formado por anillos prefabricados e interconectados mediante cables postensados. Su parte inferior es sellada con un tapón grueso de concreto, colado bajo el agua. Para facilitar la instalación de los colectores, en la cámara se dejan perforaciones a la profundidad prefijada, cerrados con tapones de madera durante el proceso de construcción (Ilustración 11.7).

Las perforaciones son distribuidas uniformemente en toda la circunferencia, en una o varias hileras. Al inicio, el diámetro de perforación debe ser mayor que el de los colectores, con objeto de facilitar su instalación, así como para remover los que presentan dificultades de instalación o funcionamiento deficiente durante la operación. Se recomienda instalar los colectores a una distancia mínima de 1.5 m arriba de la base del acuífero y del fondo de la cámara, para facilitar su instalación y el ingreso del agua.

Utilizando gatos hidráulicos en posición horizontal y vertical, se introduce un ademe ciego en el orificio abierto en la pared de la cámara y se va hincando en el terreno. Para facilitar su avance, se coloca en su extremo exterior una zapata de acero con orificios, conectada a una tubería instalada en el interior del ademe (Ilustración 11.8).

La zapata se encuentra a la presión del acuífero, mientras que el otro extremo de la tubería interior se encuentra a presión atmosférica. La diferencia de presiones induce el flujo de agua

Ilustración 11.7 Perforaciones para la colocación de los colectores

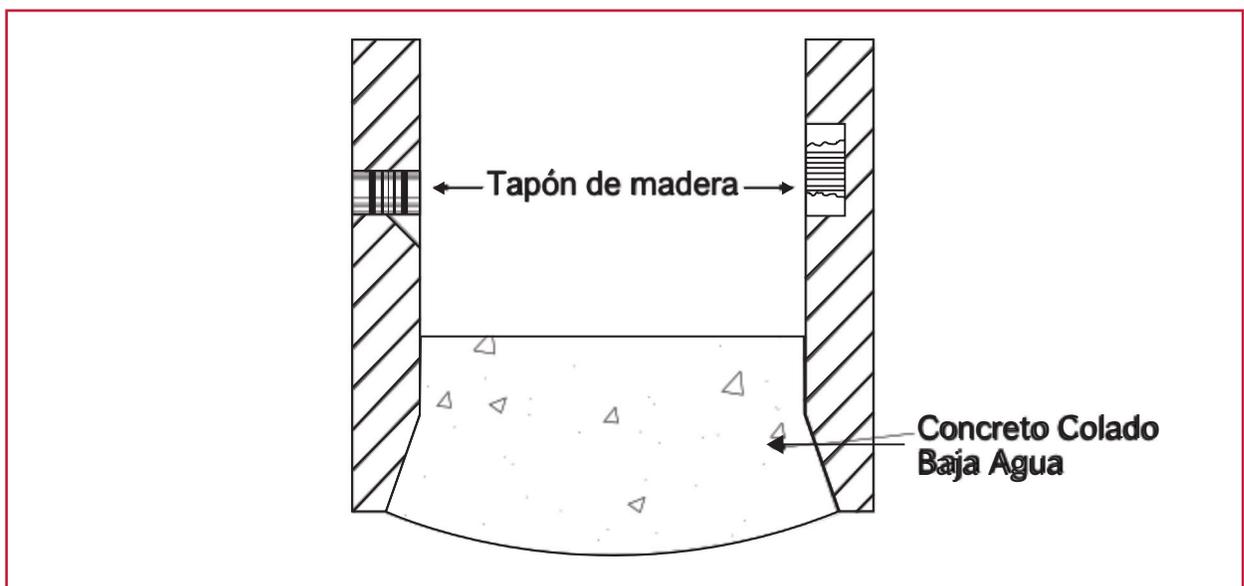


Ilustración 11.8 Dispositivos de hincado para la instalación de los tubos de cedazo



por la tubería, arrastrando hacia la cámara el detritus que puede pasar por los orificios de la zapata. Al mismo tiempo se operan los gatos con movimiento recíprocante para aflojar el terreno, facilitando la penetración del ademe y la extracción del material. La instalación tiene control direccional para modificar el ángulo de ataque del ademe, en caso de que se encuentre un canto de gran tamaño que impida el avance (Ilustración 11.9).

Una vez alcanzada la profundidad de proyecto, se continúa la extracción del material fino para desarrollar el acuífero e incrementar su permeabilidad en las inmediaciones del colector. Después que se estabiliza el flujo de agua limpia, se retira la tubería interior y se introduce el cedazo en el ademe provisional, hasta su extremo. Se procede entonces a la remoción del ademe ciego por medio de los gatos, desconectándolo de la zapata. Por último, el colector se sujeta a la pared de la cámara con una brida especial.

Ilustración 11.9 Zapata frontal y cedazo



Concluida la instalación de los colectores, se procede a un desarrollo complementario mediante aire comprimido o sobrebombeo. La descarga de los colectores a la cámara puede ser controlada mediante válvulas, lo que permite suprimir parcial o totalmente la de aquellas que extraen arena o agua de mala calidad Ilustración 11.10).

11.3.6. MANTENIMIENTO DE LOS POZOS RADIALES

Para el mantenimiento del pozo, la cámara tiene que ser desaguada, a menos que se utilice un diseño más complicado donde el extremo interior de los colectores no está sumergido. En las obras de gran capacidad, las bombas y todas las instalacio-

Ilustración 11.10 Colector individual con tapa provisional

nes conexas pueden colocarse en una casa de máquinas, en la parte superficial de la instalación.

11.4. POZOS PUNTA

Los pozos punta son pozos de pequeño diámetro (menos de 15 cm) y poca profundidad (menos de 15 m), que se instalan hincándolos en el terreno (Ilustración 11.11).

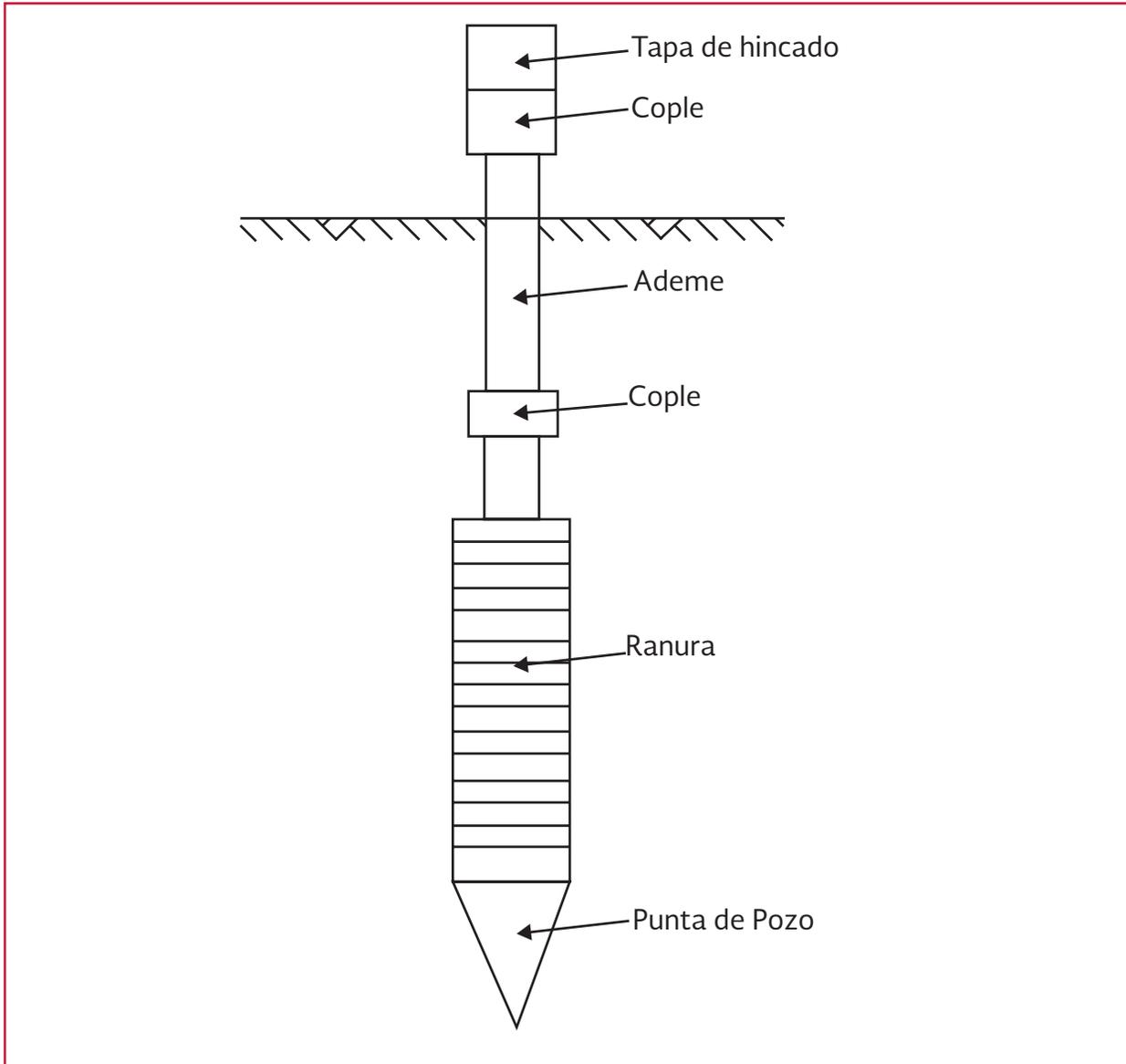
Se utilizan generalmente como piezómetros para observación de los niveles freáticos y como captaciones para mantener en seco las excavaciones de obra. Eventualmente, se utilizan como captaciones con fines domésticos o pecuarios, siempre que el agua cumpla las normas de calidad correspondientes.



Por su reducido diámetro, no hay mucha libertad de elección de los equipos de bombeo por utilizar. Los métodos de bombeo más frecuentemente empleados son la succión y la

eyección o el aire comprimido, aunque hay bombas sumergibles de diámetro pequeño (las de tipo lápiz) que pueden utilizarse en pozos punta de mayor diámetro.

Ilustración 11.11 Pozos "Punta"



12

CONTROL Y SUPERVISIÓN DE OBRA

12.1. ASPECTOS GENERALES

Para llevar a cabo el control y la supervisión de obra, es necesario contar con personal de extenso criterio y con amplia experiencia, a fin de revisar los avances de acuerdo a las especificaciones técnicas consideradas en el contrato y en el tiempo establecido.

Además, debe ser capaz de dar instrucciones adecuadas para la solución de los problemas que surjan durante el proceso de perforación o en el caso de que los resultados obtenidos durante la fase exploratoria del pozo no sean favorables e indiquen que el pozo en proyecto no podrá ser una fuente futura de abastecimiento.

12.2. CONCEPTOS BÁSICOS DE CONTROL

Con objeto de llevar adecuadamente el control de la obra, es necesario analizar los siguientes componentes del proceso:

- **Corte litológico** obtenido durante la perforación exploratoria.

- **Gráfica de la velocidad de penetración** que representa la velocidad a la cual la sarta de perforación penetra en la formación, dependiendo de su dureza.
- **Bitácora de perforación.** Se anotan todas las actividades que se realizan en cada jornada o turno, incluyendo tiempos efectivos y tiempos muertos durante la misma.
- **Interpretación de resultados durante la exploración.** Con la interpretación del corte litológico, el registro eléctrico del pozo, la gráfica de penetración y la bitácora de perforación, se está en condiciones de definir la terminación definitiva de la perforación.

Cubriendo esto, se dan las instrucciones correspondientes para efectuar las ampliaciones del diámetro de perforación necesarias para admitir la cámara de bombeo, la protección sanitaria y los ademes de tubería correspondientes, de acuerdo a las necesidades que se tengan para la explotación de la fuente de abastecimiento, a la profundidad de diseño del pozo y, sobre todo, a la potencialidad del acuífero por explotar, para, fi-

nalmente y de acuerdo con los resultados del aforo, recomendar el caudal de operación óptimo.

12.3. GRÁFICAS Y TABLAS DE CONTROL Y SUPERVISIÓN

Se deben tomar en consideración los tiempos efectivos de perforación, determinando el tipo de material que se perfora (tabla 5.1) de acuerdo al avance de las máquinas perforadoras.

- **Material tipo I o suave.** Conformado por arenas, gravas, arcillas y limos. La penetración con barrena tricónica es de cuatro metros por hora
- **Material tipo II o semiduro.** Corresponde a rocas sedimentarias como lutitas, calizas, clásticos gruesos y volcánicos, tobas riolíticas, andesíticas, basálticas y cualquier roca que esté alterada. Se tiene una penetración con broca tricónica de un metro por hora
- **Material tipo III o duro.** Constituido por rocas ígneas, riolita, basalto, andesita, dacitas, granitos y las rocas sedimentadas como cuarcitas, areniscas, boleos, etc. Se tiene una penetración de perforación de un metro por cada dos horas, dependiendo además del grado de fracturamiento de las rocas

Por lo tanto, considerando los turnos de trabajo de las máquinas de perforación, de ocho a diez horas de trabajo, se debe tener un avance de más de 32 m para el material I o suave. Para el material II o semiduro, se debe tener un avance de hasta de 8 m

por turno y para el material III o duro los avances deben de fluctuar entre 4 y 5 m, por turno.

Estos tiempos estimados no incluyen el tiempo en que la máquina se encuentra parada por causas imputables al personal que la opera o por la falta de suministro de materiales, refacciones, combustibles, etcétera.

12.4. GRÁFICAS DE AVANCE DE PERFORACIÓN

En las gráficas de perforación se deben anotar todas y cada una de las actividades que se realizan en el transcurso de la construcción del pozo. Se señalan a continuación de acuerdo a la secuencia lógica del proceso:

- Excavación de dos fosas de lodos (4 x 3 x 2 m)
- Inicio, proceso y terminación de la perforación exploratoria
- Cantidades de lodo y bentonita utilizados en el turno
- Revisión y mantenimiento de la maquinaria al inicio del turno
- Inicio, proceso y terminación de las ampliaciones del pozo
- Colocaciones de la tubería de ademe y contra ademe
- Colocación del filtro de grava. Limpieza con agua, aire y pistoneo
- Colocación de aditivos químicos
- Tiempos muertos por descomposturas de maquinaria, problemas presentados durante la perforación y por fenómenos hidroclimatológicos (lluvia, ventiscas, etcétera)

- Tiempos efectivos de perforación y de ampliación

12.5. FORMATOS DE CONTROL

En estos formatos se anotan los materiales utilizados, así como las características de la maquinaria de acuerdo a la siguiente relación:

- Suministro de bentonita en toneladas
- Suministro de agua en metros cúbicos
- Suministro de cemento en toneladas
- Suministro de grava lavada, redondeada y cribada, en metros cúbicos
- Suministro de dispersor de arcillas en litros
- Suministro de aditivos químicos en kg
- Suministro de tuberías de ademe y contra ademe en metros
- Peso de la sarta de perforación en kilogramos o toneladas
- Caudal y presión inyectada por la bomba de lodos
- Aplicación de *Pull Down* en kilogramos o toneladas
- Características principales de la máquina perforadora

- Número de golpes por minuto, si se utiliza máquina de percusión o pulseta
- Capacidad del compresor si se utiliza aire como fluido de perforación

12.6. REGISTRO DIARIO DE PERFORACIÓN Y BITÁCORA DE OBRA

En los registros diarios de perforación se anotan las actividades realizadas en el turno, así como el avance de perforación cada dos metros y el tiempo correspondiente. Estos diarios deben estar firmados por el perforista y por el inspector del pozo.

La bitácora de obra también debe llevar anotada diariamente la actividad más sobresaliente y el avance en el turno de trabajo. Además, se indican las instrucciones que se consideren pertinentes para el buen desarrollo de los trabajos.

Al final de cada turno se indica la relación de tubería instalada, los metros cúbicos de grava utilizados, las toneladas de bentonita y agua utilizada para el lodo de perforación y demás materiales inherentes a los trabajos realizados.



13

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA PERFORACIÓN DE POZOS

13.1. ASPECTOS LEGALES PARA LA PERFORACIÓN DE POZOS

Los contratos para la construcción de pozos profundos deben contener los conceptos fundamentales que establece la Ley de Obras Públicas. Esta ley entró en vigor en 1990 y está basada en la estimación de los precios unitarios y el tiempo determinado de construcción. También se debe cumplir con la Ley de Aguas Nacionales, que entró en vigor en diciembre de 1992. Deben anexarse las especificaciones técnicas generales que tienen que cumplirse durante la realización de los trabajos.

En el contrato se deben señalar claramente los nombres de la entidad contratante y el de la empresa contratada, así como el del representante legal de ambas.

Se deben indicar las declaraciones de las partes que intervienen, destacando que el contrato fue asignado por licitación pública. Asimismo, debe contener el número de cláusulas convencionales y fundamentales que sean necesarias, para dar la transparencia requerida a la ejecución de los trabajos contratados. Finalmente, el contrato debe firmarse de aceptado por los representantes legales y por dos testigos de asistencia.

Por último, se deben anexar al contrato los siguientes documentos administrativos y legales: la póliza de fianza, el programa de obra acordado, los registros actualizados ante C.N.I.C., la cédula de la S.H.C.P. como contribuyente y el permiso de explotación de agua expedido por la CONAGUA.

13.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Las especificaciones técnicas generales son las utilizadas tanto en la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, como en la Secretaría de Desarrollo Social, en la Comisión Nacional del Agua y organismos operadores de agua potable. Contienen apuntes de la experiencia en los trabajos de campo que se han realizado.

Las especificaciones que se mencionan a continuación comprenden todos los tipos de pozos de exploración y explotación de agua. En ellas se enmarcan las actividades que contempla la perforación, pero siempre enfocadas a la obtención del agua subterránea como recurso natural. Las especificaciones tienen como finalidad precisar los procedimientos y la secuela conveniente de construcción que deben de cumplir las empresas contratadas para tal fin. Con esto se pretende que las empresas entreguen un producto del

trabajo adecuadamente realizado, tanto en cantidad como en calidad, para que la obra cumpla con el requisito de satisfacer cabalmente las necesidades de la población que se va a beneficiar.

13.3. EQUIPO DE PERFORACIÓN

En la selección del equipo de perforación se deben cubrir los siguientes criterios:

- Para la perforación de estos pozos pueden emplearse equipos de percusión o equipos rotatorios, utilizando como fluidos de perforación en estos últimos agua, lodos bentoníticos de baja viscosidad (36 segundos de velocidad en embudo Marsh), aire y la combinación de estos, sean de circulación directa, inversa o neumáticos
- El equipo empleado en cada caso, debe tener la capacidad de perforación suficiente para alcanzar la profundidad que se especifique con el diámetro de barrena que se señale
- Los equipos de perforación de cualquier tipo deben estar provistos de los aditamentos necesarios para practicar pruebas de productividad y de estabilización de lodos o agua, ejecutadas por medio de cuchareos, sifoneo o de circulación de fluidos. Para ello, se debe contar invariablemente con cuchara o cubeta en el malacate auxiliar, antes de correr registros eléctricos o proceder a las ampliaciones y ademado de los pozos
- Es conveniente que cada equipo de perforación cuente con un resistímetro, sonda eléctrica y aditamentos para medición de viscosidad y densidad de lodos (embudo Marsh y balanza de lodos)

13.4. PROGRAMA DE PERFORACIÓN

El programa de perforación se desarrolla de acuerdo a lo siguiente:

- La perforación debe iniciar con el diámetro que se indique en cada caso, conservándose hasta la profundidad que sea conveniente
- En cada perforación se coloca (cuando se ordene), un contra ademe o conductor de tubería de acero, de tambos o de tipo PVC, con el diámetro y profundidad convenientes
- El contra ademe se debe cementar correctamente, vertiendo la mezcla de cemento en el espacio anular entre el tubo y la perforación. En casos especiales, puede ordenarse una cementación forzada de doble tapón
- La perforación se continúa con la barrena de dimensiones especificadas o la de mayor diámetro compatible con el diámetro interior del contra ademe, hasta alcanzar la profundidad total del pozo, o bien hasta una profundidad parcial, a partir de la cual resulte aconsejable reducir el diámetro de la perforación
- Una vez que se alcanza la profundidad total del pozo o en su caso la profundidad a partir de la cual se reduce el diámetro de la perforación, se procede a practicar las pruebas indicadas en el capítulo 9. Se corren, invariablemente, uno o varios registros geofísicos que pueden ser, eléctrico, de rayos gamma, de neutrones, sónico, de molinete hidráulico, de temperatura, o de calibración de diámetro
- En los casos en que se haya interrumpido la perforación para continuar con

diámetro menor, se procede a colocar el ademe y los cedazos correspondientes al tramo perforado (si el caso lo requiere)

- Una vez colocado y fijado el ademe en el tramo perforado, se prosigue la perforación con la barrena de diámetro conveniente o la mayor que pueda introducirse holgadamente por el ademe colocado
- Si el pozo es profundo, puede requerir de reducciones adicionales en los diámetros de la perforación, en cuyo caso se procede según lo especificado en los incisos anteriores

13.4.1. REGISTROS DE PENETRACIÓN

Durante la perforación se debe llevar un registro cuidadoso de la resistencia a la penetración.

Si el equipo es de tipo rotatorio, la resistencia a la penetración se mide por el tiempo efectivo de trabajo para avanzar cada metro. Se registra el peso adicional aplicado a la barrena y su estado de uso, las revoluciones por minuto de la mesa rotatoria y la presión y velocidad del fluido de circulación

13.4.2. MUESTREOS

Durante la perforación se deben obtener muestras de los materiales traspasados, con la frecuencia que en cada caso se especifique. Esta frecuencia puede variar entre un metro y seis metros de avance de perforación. Además, deben tomarse muestras adicionales en los cambios de la unidad litológica.

Las muestras obtenidas deben guardarse en frascos de vidrio o en bolsas de plástico adecua-

das, etiquetándolas con el nombre o número de identificación del pozo, número progresivo de la muestra y la profundidad a la que corresponda.

Para obtener cada muestra, se procede en la siguiente forma:

- Si el equipo de perforación es de tipo percusión, una vez que se alcanza la profundidad de muestreo, se toma la muestra mediante cuchara de chamela, procurando que la muestra sea representativa del fondo del pozo
- Si el equipo es rotatorio de circulación directa, de agua o de aire, la muestra se toma directamente en la descarga del retomo de la circulación, utilizando para esto una malla suficientemente cerrada
- Cuando se prevea la presencia de acuíferos salinos, se debe llevar un registro de mediciones de resistividad en los lodos y si es necesario, debe muestrearse el agua durante la perforación, con los intervalos que se especifiquen. Estos registros pueden practicarse tomando de la circulación de lodos una porción, midiendo su resistividad y comparándola con la de la presa de lodos. Si la perforación es por percusión, se debe llevar una gráfica de resistividad de las muestras de lodos que se tomen en cada cuchareo, que se ejecuta para extraer los recortes de perforación del fondo del pozo a medida que se avanza
- Por último, se forma el corte litológico definitivo y de inmediato se prepara el proyecto de terminación del pozo. Para esto, se debe contar con las muestras de los materiales cortados durante la perforación, la resistividad de los lodos, con el auxilio de los registros que se hayan corrido

13.4.3. REGISTRO DE PERFORACIÓN

Durante la perforación de cada pozo se debe llevar un registro cuidadoso en formas aprobadas de registro. En los registros se debe consignar lo siguiente:

- Nombre o número de identificación del pozo
- Zona a la que pertenece, localidad, municipio y estado
- Fecha y hora de inicio, así como terminación de cada turno de trabajo
- Clase, marca, tipo y capacidad en profundidad, diámetros y levante del equipo de perforación y capacidad del compresor y de la bomba de lodos
- Horas efectivas de trabajo en cada turno. Detención de labores y causas que las motivaron
- Profundidad a la que se registran niveles de agua o lodo y pérdidas parciales o totales de circulación
- Nivel de agua o lodo en el pozo al iniciar y terminar cada turno de trabajo
- Cambios de barrena en el equipo rotatorio, anotando si es nueva, reparada y su estado de uso, además el tipo o el afilado en equipo de percusión
- Tiempo empleado para avanzar cada metro, se anota el peso aproximado de la sarta de perforación, estado de uso de la barrena, así como las lecturas del indicador de peso, las R/min de la mesa rotatoria, presión y velocidad del fluido de circulación cuando se trate de equipos rotatorios
- Anotar también en el registro de perforación el número progresivo de cada muestra con la profundidad a la que

corresponde y el material de que se trate, según clasificación de campo. Llevar registros de cambios de resistividad en el fluido de perforación, anotando también la resistividad en la fosa de lodos y del suministro de agua

- Anotar todas aquellas observaciones adicionales que puedan proporcionar información respecto al comportamiento de la perforación, tales como las variaciones bruscas del nivel del agua o lodo, las pérdidas de circulación, los derrumbes, las pruebas de estabilización de nivel y de productividad con sifoneo, la circulación y el cuchareo ya sea con pulseta o rotatoria

13.4.4. TERMINACIÓN DE LOS POZOS

Una vez que se estabiliza el nivel de agua en el pozo después de realizar las pruebas de productividad, que se tiene el corte geológico con las muestras de las formaciones obtenidas durante la perforación y que se cuenta con el registro eléctrico o algún otro registro que se ejecute, se determina si el resultado de la perforación es positivo o negativo y en consecuencia, se hace el proyecto de terminación y de ademado del pozo.

En este caso, se procede de la siguiente manera:

- Se debe indicar en qué tramo o tramos deben quedar ubicados los cedazos y el filtro de grava (si se requiere) y cuál o cuáles deben de llevar ademe ciego. Asimismo, se define qué parte del ademe ciego debe o no cementarse, considerando la presencia de acuíferos libres o confinados y la calidad de las aguas en los acuíferos

- El espesor de las tuberías de ademe metálico o de tipo PVC se determina según las normas de resistencia de tubería vigentes. En casos especiales, pueden modificarse los espesores, adaptándolos a los que se encuentran en el mercado, las especificaciones son ASTM A 53 Grado B
- Los cedazos pueden ser de ranura continua o PVC, si las características del acuífero lo requieren, o de acero con ranura tipo canastilla, en tramos de 6 m de longitud, con una costura longitudinal y ninguna transversal, con dimensiones de abertura que se soliciten en cada caso
- El ademe se forma con tramos completos de tubería y de cedazo. Los ademes metálicos pueden unirse mediante soldadura. La longitud total del ademe debe ser tal que sobresalga un metro del terreno natural
- La tubería debe estar holgada en la perforación y debe girar libremente cuando está suspendida, quedando terminantemente prohibido hincarla a golpes. Se debe decidir si la columna de ademe y cedazo puede quedar colgada desde la superficie o apoyada en el fondo, con posibilidad de un colado de concreto si así se determina. Cuando se use cedazo de ranura continua, debe quedar invariablemente colgada
- Cuando se trate de pozos compuestos por tramos de diámetro decreciente, la parte inferior de cada tramo debe estar provista de una zapata, con objeto de retener el filtro de grava al proseguir la perforación.
- La unión de los tramos de ademe, cuando se trate de diámetros decrecientes, puede estar construida por simple traslape o por reducción de campana
- El ademe debe quedar centrado en la perforación, para lo cual tiene que estar provisto de los espaciadores y centradores necesarios
- La verticalidad del ademe en la zona correspondiente a la cámara de bombeo tiene una tolerancia de dos tercios del diámetro del ademe, por cada treinta metros de profundidad, siempre y cuando la inclinación con respecto a la vertical no sobrepase $\frac{1}{2}^\circ$ (medio grado) por cada cien metros de profundidad
- El alineamiento del ademe en la zona correspondiente a la cámara de bombeo debe hacerse con base en el registro de verticalidad
- Una vez instalado y centrado el ademe en la perforación, se procede a colocar el filtro de grava en el espacio anular entre la perforación y el tubo, en las zonas determinadas en el proyecto del pozo
- Para colocar el filtro se vacía la grava en el espacio anular. El engravado de los pozos se hace mediante bombeo hidráulico a alta velocidad con grava graduada. El descenso de la grava se verifica periódicamente con una sonda adecuada
- La grava debe ser redondeada, estar lavada y del calibre que se especifique en cada caso. Como norma general, se considera que el diámetro de la grava está comprendido entre 12.7 mm (1/2") y 3 mm (1/8")
- Una vez que el filtro de grava queda colocado, se procede a cementar las zonas proyectadas y a colocar, en caso necesario, los tubos engravadores
- Apoyándose básicamente en los resultados obtenidos en registros y pruebas de productividad, las ampliaciones en la

cámara de bombeo y en los tramos inferiores del pozo, abajo de la cámara, deben regirse de acuerdo a las siguientes indicaciones: las ampliaciones, pudiendo ser menores, deben tener como máximo, para la cámara de bombeo, de 43 a 56 cm (17 a 22") de diámetro nominal. Debe ademarse con tubo ciego y cedazo de diámetros, que pudiendo ser menores, deben tener como máximo, 35 a 40 cm (14 a 16 ") nominal de diámetro

13.5. PÉRDIDAS DE FLUIDOS O DE CIRCULACIÓN

Cuando en la perforación se presentan pérdidas parciales o totales en la circulación de fluidos de perforación, se procede de la siguiente manera:

- Se suspende la perforación y se mide de inmediato con sonda eléctrica u otro dispositivo, el nivel de fluido dentro de la perforación, si es que existe. Se confirma el nivel hasta el fondo de la misma, o bien su variación de ascenso o descenso, con relación a las mediciones del nivel que anteriormente se registraron
- En caso de que no haya nivel dentro de la perforación, se procede a utilizar obturantes, con el fin de tratar de mantener la estancia del fluido en el pozo (cuando se utiliza pulseta) o su circulación (cuando se usa rotaria) y poder continuar con la perforación
- El procedimiento para continuar la perforación depende de la estabilidad o inestabilidad de los materiales que se perforan, en caso de que se establezca nivel arriba del fondo del pozo

13.5.1. PÉRDIDA TOTAL DE FLUIDOS O DE CIRCULACIÓN EN MATERIALES INESTABLES

Cuando en la perforación se presentan pérdidas totales de fluidos o de circulación de materiales flotantes, se procede de la siguiente manera:

- Si las paredes del pozo son inestables y se ha establecido nivel sobre el fondo del pozo, se procede a colocar un tapón removible, 5 m arriba de la profundidad en donde se presente la pérdida, siempre que esta sea total. Después, se procede a efectuar las ampliaciones respectivas, para ademarse el tramo de pozo correspondiente a la parte superior del tapón, con el proyecto de diámetros y cedazos que se especifiquen
- Se cuela una zapata de cementación en el fondo del ademe, para impedir, en caso de colocar filtro de grava, que este penetre hacia el fondo del pozo al momento de romper con la barrena la propia zapata y el tapón removible antes señalado
- Una vez ademado el pozo en esta forma, sobre el tapón se procede a continuar la perforación con el diámetro de barrena que pueda perforar de 12 a 14 pulgadas dentro del ademe ya colocado. Se remueve o se rompe el tapón para penetrar en la formación acuífera, pudiendo perforar con 9 o 12 pulgadas nominal de diámetro dentro de ella
- Si esta formación acuífera es inestable, se permite el uso de bentonita y aditivos estabilizadores no permanentes y se continúa la perforación con pérdidas

totales o parciales, hasta una profundidad en que no se ponga en peligro la construcción del pozo, procurando lograr una cámara de azolves de 10 a 30 m de profundidad

- Una vez que se alcanza la profundidad determinada, se confirma que el agujero quede limpio y estable hasta su fondo. Después, se sube y se baja la sarta de perforación las veces que se consideren convenientes, con el fin de que este tramo final de perforación permita libremente la entrada de un cedazo de 4 a 8 pulgadas de diámetro. El cedazo se introduce y se suelta en el fondo del pozo con un traslape que penetre dentro del ademe (ya colocado) un mínimo de 3 m sobre el extremo inferior del ademe
- Posteriormente, si es necesario, se coloca el filtro de grava que se pueda introducir alrededor del cedazo, siempre que se lleve a cabo con dispositivos que tapen la boca superior del traslape del cedazo, para evitar la introducción de grava dentro de él. Se concluye así la terminación del pozo, después de confirmar que no hay azolves, residuos o materiales en la profundidad total de la perforación, condición que debe mantenerse bajo la responsabilidad del contratista hasta la recepción de la obra

13.5.2. PÉRDIDAS PARCIALES DEL FLUIDO O DE CIRCULACIÓN EN MATERIALES INESTABLES

Cuando la pérdida sea parcial y exista nivel establecido, se continúa la perforación, para lo cual, pueden utilizarse lodos bentoníticos y aditivos estabilizadores de acción no permanente

para seguir obteniendo circulación hasta la superficie.

En caso de persistir las pérdidas parciales, la perforación continúa hasta una profundidad, de acuerdo con las características acuíferas del lugar y se elabora el proyecto de terminación del pozo.

13.5.3. PÉRDIDAS TOTALES DE FLUIDOS O DE CIRCULACIÓN EN MATERIALES ESTABLES

Cuando en la perforación se presentan pérdidas totales de fluidos o de circulación de materiales estables, se procede de la siguiente manera:

- Cuando en el pozo se establezcan pérdidas en un nivel arriba de su fondo, se debe ordenar en la perforación exploratoria pruebas de productividad y de estabilización del nivel. También se puede ordenar una prueba de producción por medio de bomba, cuyas dimensiones están definidas por la profundidad del pozo, su diámetro y el nivel de lodos que se registre
- Si las condiciones de los materiales lo permiten, se continúa la perforación utilizando aire, agua o la combinación de estos y se extraen periódicamente los cortes por medio de cuchara, sea rotaria o de percusión. Se avanza dentro de la formación acuífera hasta la profundidad conveniente, tomando en consideración las condiciones de avance que no pongan en peligro la terminación del pozo
- Se realizan nuevamente pruebas de productividad y sus registros
- De acuerdo con lo anterior, se procede a colocar un tapón removible 5 m arriba

de la profundidad donde se registró la pérdida total y se procede a ejecutar las ampliaciones para la cámara de bombeo. Se pueden utilizar en la perforación lodos bentoníticos hasta alcanzar el tapón. Se debe colocar algún tramo de ademe para protección de la parte superior del pozo, en la cámara de bombeo, siguiendo instrucciones específicas de ampliación. No se considera el ademado de toda la longitud del pozo, puesto que se trata de materiales estables

- A continuación se procede a remover o a romper el tapón y a cambiar los fluidos de perforación por agua o aire y se baja la sarta de perforación hasta el fondo del pozo, para limpiarlo de los azolves que pudiera ocasionar esta operación
- Se determina si la perforación debajo del tapón debe ampliarse o no y hasta qué profundidad debe llevarse esta ampliación, en caso de que se requiera aumentar la profundidad de la cámara de bombeo
- Si la terminación del pozo se hace con máquina de percusión, se puede proseguir la perforación del pozo unos 20 metros adicionales, con diámetros adecuados, con objeto de formar una cámara de azolves y lograr un pozo limpio. En caso de que la terminación del pozo se efectúe con equipo rotatorio, se procederá a una profundización adicional no mayor de 25 m, como cámara de azolves. Esto, siempre que no se ponga en peligro la terminación del pozo, ya que esta se efectuará con circulación a fondo perdido, empleando aire o agua y también mediante cuchareo
- Una vez terminada la cámara de azolves, se procede a limpiar perfectamente el pozo hasta su fondo, para lo cual

se introduce la sarta de perforación hasta el fondo del mismo las veces que sean necesarias. Se debe comprobar plenamente que no queden materiales y recortes de perforación, azolves y residuos, condición que debe mantenerse bajo responsabilidad del contratista, hasta la recepción de la obra

- Cuando se trate de pozos de explotación en un campo conocido, se puede ordenar la ejecución de la cámara de bombeo desde un principio, antes de la perforación total
- Terminadas las operaciones anteriores, se ejecutan los trabajos de limpieza y de desarrollo señalados

13.5.4. PÉRDIDAS PARCIALES DE FLUIDOS O DE CIRCULACIÓN EN MATERIALES ESTABLES

Si las pérdidas de fluidos en materiales estables son parciales y ya se ha establecido el nivel del agua en el pozo, se continúa la perforación con lodos bentoníticos y aditivos de acción no permanente, para seguir obteniendo circulación hasta la superficie. La perforación se continúa hasta que se registre una pérdida total de circulación.

Posteriormente, se ejecutan las pruebas de productividad y de registros geofísicos. La terminación del pozo se formula de acuerdo a las siguientes instrucciones:

Colocar un tapón al fondo proyectado de la cámara de bombeo. No se considera la colocación de un ademe ya que se trata de materiales estables. A continuación se procede a remover o a romper el tapón, cambiando los fluidos de perforación por aire o agua. Se baja la sarta de perforación hasta el fondo del pozo, para lim-

piarlo de los azolves que pudiera ocasionar esta operación.

Se da por terminado el pozo, siguiendo las instrucciones correspondientes a la terminación.

Para el caso en que la pérdida sea total, se procede de la siguiente manera:

Se coloca un tapón removible 5 m arriba de la profundidad donde se registró la pérdida total y se procede a ejecutar las ampliaciones para la cámara de bombeo. Se pueden utilizar en la perforación lodos bentoníticos hasta alcanzar el tapón. Solo si es necesario, se coloca algún tramo de ademe para la protección de la parte superior del pozo en la cámara de bombeo. No se considera el ademado de toda la longitud del pozo, puesto que se trata de materiales estables.

A continuación se procede a remover o a romper el tapón y se cambian los fluidos de perforación por agua o aire. Después se baja la sarta de perforación hasta el fondo del pozo para limpiarlo de los azolves que pudiera ocasionar esta operación.

13.6. PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Para contar con los elementos necesarios que permitan realizar un análisis crítico para la revisión de las propuestas de costos en la perforación de captaciones de agua subterránea, es fundamental que se cuente con un catálogo de

precios unitarios actualizado. Para obtenerlo, se debe de seguir el procedimiento que a continuación se indica.

En primer término se realiza el análisis del costo horario de una máquina perforadora modelo Garden Denver 2000, con una capacidad teórica de 600 m de profundidad, para lo cual se consideran los cargos fijos que incluyen la depreciación, la inversión, los seguros y el mantenimiento de maquinaria.

A partir de los precios unitarios calculados por hora de máquina en operación e inactiva, se procede a analizar y a calcular los precios unitarios, clasificados por actividades en la perforación del pozo. Se toman en cuenta, además, los siguientes factores:

- Tiempo de penetración en la perforación con diámetro exploratorio de 12 1/4" de acuerdo a la gráfica de penetración presentada en el capítulo 12, Control y supervisión de obra
- Clasificación de material en tipo I, II y III, de acuerdo al grado de dificultad que presentan a la penetración con la acción de la sarta y de la barrena de perforación, (Tabla 5.1)
- Costos de materiales, la barrena de perforación y su rendimiento en metros
- Costo de la brigada de perforación y su rendimiento en metros por jornada de trabajo de 8 horas



CONCLUSIONES

El objetivo central de este libro es instruir y servir de guía al personal técnico encargado de la construcción, operación y mantenimiento de pozos profundos. Aquí también se exponen los conceptos básicos que permiten una mejor comprensión de los procesos hidrológicos y geológicos asociados con la extracción de agua mediante esta tecnología.

Al optar por esta forma de captación, se debe considerar la disponibilidad de agua subterránea para cada acuífero en particular y su cálculo irá de acuerdo a la NOM-011-CONAGUA-2000, para no comprometer los volúmenes de agua y para mantener el equilibrio ecológico. En este documento se mencionan los estudios preliminares que deben realizarse para conocer las características hidrogeológicas de la zona y el equipo requerido para tal fin, comentando sus ventajas y desventajas.

En este libro también se trata el procedimiento de construcción y operación de los pozos y de sus respectivas problemáticas, así como lo referente al mantenimiento de los pozos profundos. Se abarcaron los conceptos más sencillos, las tablas comparativas entre los diferentes métodos existentes para cada caso, las especificaciones y los procedimientos respectivos conforme a las normas vigentes.

Con la amplia recopilación bibliográfica lograda en este libro, se pudieron contrastar puntos de vista de autores tanto nacionales como extranjeros, incluyéndose de estos últimos, documentación tal que permite abordar el tema de la captación en pozos profundos, observando procedimientos más eficientes, basados en el análisis de distintos casos que se han presentado a lo largo de la historia.

Se incluyen anexos con información detallada de los precios unitarios de la perforación, tablas comparativas de los métodos de perforación así como información sobre los equipos y herramientas utilizados en el proceso constructivo.

Se espera que este libro, parte de la colección *MAPAS*, sea de utilidad para el usuario y que le permita desarrollar de manera eficaz, proyectos de captación de agua con pozos profundos, encaminados a beneficiar a la sociedad, sin dejar de lado la protección y el respeto al medio ambiente.

A

ADITIVOS DE PERFORACIÓN

Nota aclaratoria:

En las páginas siguientes se proporciona información acerca de algunos de los productos empleados como aditivos de fluidos de perforación. De cada uno se muestran sus características y de acuerdo a estas, dicho producto es o no recomendable para casos y condiciones determinadas. Sin embargo, un factor común en todos es su influencia en la viscosidad del agua y la afectación que provocan en la permeabilidad natural de las formaciones. Bajo estas consideraciones, se recomienda que se empleen bajo la consulta de personal especializado y que se apliquen de acuerdo a las especificaciones del fabricante.

A.1. HOLEPLUG

Descripción

La bentonita graduada Holeplug es una arcilla de ocurrencia natural que se utiliza para sellar y taponar agujeros perforados. La arcilla es una bentonita de Wyoming a base de sodio (montmorillonita) que posee la característica específica de expandirse en agua dulce. La bentonita graduada Holeplug se extrae de depósitos que tienen la habilidad de expandirse a una velocidad lenta controlada. La bentonita Holeplug descenderá por

una columna de agua en reposo y llegará fácilmente al fondo del agujero antes que comience la hidratación o hinchamiento en el agua. Puede lograrse un llenado completo del espacio anular, y esto actúa para impedir la acumulación de las partículas en la parte superior del agujero. El llenado completo es un requerimiento para la formación de un buen tapón.

La bentonita graduada Holeplug está dimensionada en dos gamas partículas, Holeplug 3/8" y Holeplug 3/4". La bentonita Holeplug 3/4" es extraída y tamizada de modo que 100 por ciento pasará a través de un tamiz de 3/4", pero será retenida en un tamiz de 3/8". De igual forma, 100 por ciento será retenido en un tamiz de 1/4". Las partículas son:

- Holeplug 3/4" gránulos de 3/8" a 3/4"
- Holeplug 3/8" gránulos de 1/4" a 3/8"

El tamaño del espacio anular abierto determinará el tamaño del producto de bentonita Holeplug que se utilizará.

- Cuando el espacio anular es de 1 1/2" o más, se utiliza bentonita Holeplug 3/4"
- Cuando el espacio anular es de 3/4" o más, se utiliza bentonita Holeplug 3/8"

Usos recomendados

- Sellado de los paquetes de grava
- Taponamiento de pozos de sondeo
- Sellado alrededor de la tubería de conducción
- Contención de agujeros antes del disparo y taponamiento de agujeros de disparo sísmico
- Sellado de zonas de pérdida de circulación
- Cierre de pozos artesanos

Características

- Impide la entrada de agua de la superficie al pozo o sondeo
- Impide el movimiento vertical de fluidos en el agujero entre zonas porosas
- Forma un sello permanente y flexible en el interior del agujero
- Recuperación fácil de tuberías
- Impide los reventones y la formación de cráteres en la superficie del agujero de disparo
- Elimina el proceso de limpieza después del disparo y el taponamiento de los agujeros de disparo
- Permite volver a entrar al agujero
- Alternativa superior a la bentonita en tabletas
- Empacado en sacos cosidos fáciles de abrir

Este producto es seguro desde el punto de vista ambiental.

A.2. AQUAGEL GOLD SEAL

Descripción

La bentonita de alto rendimiento de primera calidad Aquagel Gold Seal se extrae de depósitos

ubicados en Wyoming. La bentonita Aquagel Gold Seal no contiene aditivos poliméricos o tratamientos químicos de ninguna clase. Solo la bentonita de más alta calidad se utiliza para el producto Aquagel Gold Seal. La bentonita de Wyoming está compuesta predominantemente de montmorillonita sódica (un aluminosilicato en capas) y es una arcilla de ocurrencia completamente natural.

La bentonita Aquagel Gold Seal actúa como viscosificador y reductor de filtrado para fluidos de perforación. A través de superficies de carga positiva y negativa, las partículas de arcilla forman estructuras gélicas y desarrollan viscosidad. La arcilla está estructurada en capas planas de tipo laminar que se superponen y forman una torta de filtro delgada e impermeable en la superficie de un pozo de sondeo.

La bentonita Aquagel Gold Seal es una arcilla seca en polvo que puede agregarse directamente al agua dulce o a los fluidos de perforación de agua dulce. Para utilizarse en agua salada o salobre (menos de 8000 ppm de cloruro), la bentonita Aquagel Gold Seal se hidrata primero en agua dulce y luego se agrega el agua salada o salobre.

Cuando se utiliza en los niveles de tratamiento y de la manera recomendada, la bentonita Aquagel Gold Seal es un producto seguro desde el punto de vista ambiental.

Usos recomendados

- Para mejorar la capacidad del fluido para limpiar el agujero
- Para reducir el paso o filtración de agua hacia formaciones permeables
- Para formar rápidamente una torta de filtro delgada con baja permeabilidad

- Para promover la estabilidad del agujero en formaciones de poca consolidación
- Para impedir la pérdida de fluidos a zonas de pérdida circulación

Características

- No contiene aditivos poliméricos o químicos
- Material de arcilla de ocurrencia completamente natural
- Fabricada y de calidad controlada para exceder las normas APL
- Producto aceptable desde el punto de vista ambiental

Aquagel Gold Seal no es contaminante ni tóxico si se utiliza en la forma recomendada. Fue analizada por un laboratorio independiente y cumplió con el protocolo del Procedimiento de Lixiviación de Características de Toxicidad (TCLP) de EPA (Agencia de Protección Ambiental). Los datos del análisis se encuentran disponibles bajo solicitud.

A.3. BAROID BENTONITE PELLETS

Descripción

El agente de sellado y taponamiento Baroid Bentonite Pellets se fabrica con bentonita de sodio de alto rendimiento que ha sido procesada sin polímeros orgánicos u otros aditivos. No se ha incluido ningún relleno o agente adulterante en Baroid Bentonite Pellets. Las tabletas Baroid Bentonite Pellets se moldean a presión para formar tabletas duras, lo que facilita su colocación en los agujeros de pozos. La configuración de tableta endurecida sin recubrimiento de polímeros o agente de liberación de moldeo,

retarda la característica de hinchamiento de la bentonita durante un período suficientemente largo para permitir la colocación en los pozos de sondeo. Las tabletas Baroid Bentonite Pellets pueden ser embutidas en el agujero cuando sea necesario.

Cuando se colocan en el agujero de un pozo, las tabletas Baroid Bentonite Pellets forman una lechada de revestimiento, un tapón de aislamiento de instrumentos o un agente de taponamiento de un agujero abandonado. Cuando las tabletas Baroid Bentonite Pellets se colocan correctamente y se permite que se hidraten, forman un sello semisólido pero flexible. La conductividad hidráulica medida en un parámetro fijo de pared es inferior a 1×10^{-8} cm/s. Las tabletas Baroid Bentonite Pellets hidratadas son químicamente estables en la presencia de agua, salmuera y agua que contiene hidrocarburos orgánicos. Las tabletas Baroid Bentonite Pellets son rehidratables a las especificaciones originales si el tapón se somete a ciclos mojados/secos.

Las tabletas Baroid Bentonite Pellets son bentonita Wyoming de alta calidad compuesta principalmente de montmorillonita sódica. La montmorillonita sódica es una forma intumesciente de arcilla que agrupa varias características necesarias. Las tabletas Baroid Bentonite Pellets se ofrecen en tres tamaños: 1/4", 3/8" y 1/2". El material de bentonita es estable en almacenaje, no es afectado por el calor o el frío y no se descompone o fermenta. Cuando se colocan en el interior del agujero, las tabletas se adaptarán al tamaño y forma del pozo de sondeo, y se expandirán para llenar el espacio disponible. Las tabletas Baroid Bentonite Pellets no requieren ningún equipo de manejo especial, son limpias

de usar y no son solubles en compuestos orgánicos.

Usos recomendados

Sellado o enlechado de tubería de revestimiento de plástico o acero.

Aislamiento de intervalos de cribado, instrumentación en la subsuperficie y zonas de muestreo.

Proporciona una interfaz protectora entre la grava y la lechada de cemento,

Taponamiento de pozos abandonados.

Crear un sello subterráneo estable y permanente en:

- Pozos de control y observación
- Agujeros de desecado
- Agujeros Caissón
- Agujeros de muestreo de suelo
- Agujeros de exploración de minerales
- Pozos de agua

Características

- Bentonita de Wyoming de alta calidad (arcilla a base de sodio) que se expandirá en la presencia de agua
- La forma endurecida elimina el hinchamiento prematuro y permite su uso en agujeros mojados o secos
- Forma un sello subterráneo permanente y flexible, que puede retirarse fácilmente
- No genera calor de hidratación
- No hay sustancias orgánicas ni tratamientos químicos en las tabletas
- Rehidratable a las especificaciones originales
- Puede embutirse en el pozo o sondeo

A.4. BENSEAL /EZ MUD SLURRY

Descripción

La pasta aguada Benseal/Ez Mud es una técnica patentada que proporciona un método simple y de bajo costo para el sellado y enlechado eficaz de pozos de sondeo, tuberías de revestimiento de pozos y estructuras de tierra. Este sistema de pasta aguada retarda el hinchamiento de la bentonita, reduce la presión de bombeo y permite que se coloquen concentraciones más altas de sólidos de sellado en la aplicación.

Usos recomendados

La pasta aguada Benseal/Ez Mud proporciona cualidades superiores para:

- Sellar y enlechar tuberías de ademe de plásticos y acero
- Sellar pozos de sondeo para instrumentos y pruebas hidrológicas y de ingeniería
- Sellar la tubería conductora en operaciones de perforación
- El sellado sanitario en la construcción de pozos de agua
- Taponar y abandonar pozos de sondeo de exploración de minerales, agua y exploración sísmica
- Controlar la pérdida de circulación en pozos de perforación

Características

- Se reconstituye. Vuelve a formarse el sello cuando se introduce agua
- Conveniente de usar. La bentonita Benseal y el polímero Ez Mud son seguros y

fáciles de usar

- Estable durante el almacenaje, reduciendo las pérdidas y el costo
- No contiene contaminantes, no es tóxica, no se descompone ni fermenta
- Retarda la gelación. Se aplica una cantidad máxima de sólidos de bentonita y permite que se expandan en posición
- Presión reducida de bombeo. Cantidad máxima de sólidos a una presión mínima de circulación sin fracturación de la formación
- No libera calor de hidratación y no produce daños por calor a la tubería de revestimiento de plástico
- Se bombea con el equipo de perforación. No se necesita equipo especial
- Sello flexible permanente. Impide el mezclado de capas acuíferas y la entrada de contaminantes de la superficie. No está sujeto a encogimiento, secado o agrietamiento permanente
- Baja densidad/densidad flexible. Su densidad se ajusta agregando material pesado
- Permite que se vuelva a entrar al agujero sin contaminar el lodo
- Permeabilidad inferior a 3×10^{-8} cm/s

A.5. EZ MUD

Descripción

Ez Mud es una emulsión polimérica aniónica de líquido blanco rápidamente soluble en agua dulce o salada. Ez Mud puede utilizarse para mejorar las propiedades de los fluidos Quik Gel de bajo contenido de sólidos y fluidos de inyección de aire/espuma. Los fluidos de perforación Ez Mud son aplicables a todo tipo de operaciones de

perforación, incluyendo:

- Pozos de agua
- Extracción de núcleos con diamante
- Exploración de minerales
- Agujeros de disparo de sismógrafo
- Agujeros para voladura
- Agujeros de control/observación
- Investigaciones de suelos y cimientos
- Pozos de eliminación/inyección

Usos recomendados

Ez Mud puede utilizarse en agua pura, en lodos de Quik Gel/bentonita y en la inyección de aire espuma para:

- Estabilizar formaciones sensibles al agua que se expanden, derrumban o desintegran en fluidos de perforación normales
- Impedir los anillos de lodo, la aglomeración de arcilla alrededor de la barrena en formaciones de arcilla
- Reducir el torque de la tubería de perforación y la presión de bombeo
- Eliminar el traqueteo de las varillas en las perforaciones de extracción de núcleos con diamante
- Mejorar las propiedades de los fluidos de perforación

Características

- Fácil de mezclar
- Precipita las esquilas rápidamente en las fosas. Impide la recirculación de esquilas perforadas
- Lubricidad. Reduce el torque de la tubería de perforación y la presión de circulación
- Estabilidad de la arcilla lutita. Impide el

hinchamiento y la desintegración de la formación de las arcillas y lutitas

- Compatible con la bentonita. Mejora las propiedades del lodo de Quik Gel/bentonita
- Viscosificador. Espesador rápido y eficiente para mejorar la limpieza del agujero. Controlar el traqueteo de las varillas en las perforaciones de extracción de núcleos con diamante y mejorar la estabilidad en secciones fracturadas del agujero
- No es tóxico. Adecuado para utilizarse en la perforación de pozos de agua potable
- No fermenta. No es susceptible a la pérdida de propiedades debido a la degradación de microorganismos
- Control de filtración. Reduce con eficacia la pérdida de agua en lodos de Quik Gel/bentonita
- Cantidades pequeñas producen los resultados deseados. La forma líquida asegura una utilización completa de todo el Ez Mud agregado
- Estable. Ez Mud no está sujeto a la desintegración por corte que es característica de otros polímeros
- Adición de sal KCL. Puede agregarse 3 por ciento por peso de KCL para realzar la estabilización de la lutita
- No causa daño a las formaciones productivas. Ez Mud es soluble en agua
- Se descompone a la viscosidad del agua con el tratamiento de hipoclorito de sodio (Clorox) durante la esterilización del pozo, 2 a 3 cuartos por cada 378.5 L.

Nota: usar Clorox no perfumado únicamente

A.6. MATERIALES DE PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN

La pérdida de circulación ocurre cuando el fluido de perforación entra a los vacíos en la formación expuesta en el pozo. Para detener la pérdida del fluido de perforación, los vacíos deben obturarse para que la costra del filtrado se pueda depositar en la superficie porosa. El material obturante debe contener partículas de tamaño tal como para tapar las aperturas. Como los tamaños de las aperturas no son conocidos, la práctica normal consiste en añadir una variedad de tamaños y formas de partículas para garantizar la obturación. Por consiguiente, Baroid provee varios productos designados para detener la pérdida de circulación.

Algunos productos no pueden ser utilizados para toda condición. Por ejemplo, en caso de que la bomba no sea capaz de manejar el material. En la perforación de pozos de agua, la introducción de materiales obturantes a la formación acuífera podría cerrar la corriente de agua al pozo si no se puede disolver el material. Entonces, la selección de un material de pérdida de circulación depende de las condiciones específicas de uso.

Los siguientes productos cubren un intervalo de aplicaciones en caso de pérdida de circulación.

Tabla A.1 Materiales de pérdida de circulación

| Producción | Descripción | Envase | Cantidad añadida al lodo (kg/m ³) |
|------------|-------------------------------|------------------|---|
| Fibertex | Fibras de caña procesada | Bolsa de 18.1 kg | 12-70 |
| Hyseal | Fibras orgánicas desmenuzadas | Bolsa de 18.1 kg | 6-35 |
| Jelflake | Película de celofán | Bolsa de 11.3 kg | 6-25 |
| Micatex | Muscovita pulverizada | Bolsa de 22.7 kg | 5-25 |
| Wall-Nut | Escama de cáscara de nuez | Bolsa de 22.7 kg | 6-30 |

*(Grado: fino, medio, grueso, de fineza de harina.)

A.7. QUIK GEL

Descripción

Quik Gel es una bentonita sódica de origen occidental, de primer grado y fina molienda. Está especialmente procesada para proporcionar facilidad de mezcla y calidades superiores para la preparación de lodos en agua fresca.

Empaque

Quik Gel viene empaquetado en bolsas de papel hermético de múltiples hojas. Cada bolsa contiene 22.7 kg.

Funciones

Quik Gel se añade al agua limpia para facilitar las siguientes funciones:

- Aumentar la capacidad de limpieza del pozo
- En las secciones permeables, forma una delgada costra de filtración en la pared

del pozo que se quita fácilmente por medio de un contralavado

- Proporciona estabilidad al pozo en formaciones mal consolidadas y susceptibles a derrumbes
- Reduce el escape de agua hacia formaciones permeables
- Evita o impide pérdidas de circulación

Quik Gel se añade a aguas limpias:

- Para preparar un lodo económico de bajo contenido de sólidos
- Para preparar el gel espuma para la perforación a aire

Características

- Produce una cantidad de lodo dos veces mayor y de la misma viscosidad que una cantidad equivalente de bentonita estándar del APL
- De rendimiento rápido, llega rápidamente a alta viscosidad
- Fácil de mezclar, ahorra tiempo y esfuerzo en la preparación de lodos
- Conveniente, las bolsas de 22.7 kg son fáciles de manejar
- Ecológicamente aceptable, no tóxico, no fermenta

Aplicaciones

| Cantidades aproximadas de Quik Gel añadido al agua limpia | kg/m ³ |
|---|-------------------|
| Condiciones normales de perforación | 15 - 30 |
| Grava y otras formaciones mal consolidadas | 35 - 50 |
| Pérdida de circulación | 40 - 55 |
| Quik Gel, añadido a lodos de agua limpia, mejora el rendimiento general (mejor limpieza de pozo, costra de filtrado más delgada, mejor estabilidad de pozo) | |
| Estabilidad de pozo | 6 - 14 |

A.8. ARIGEL

Descripción

Es un polímero seco que se mezcla rápidamente. Produce burbujas que dan una buena lubricación y aumenta la eficiencia en la perforación, controlando las pérdidas del fluido.

Mantiene estable las paredes de la formación.

Uso recomendado

Está diseñado para la perforación con rotaria con aire agua (salada/dulce) y se requiere únicamente una capa delgada de gelatina.

Características

Aumenta la capacidad de levante, elimina partículas de arcilla, se mezcla rápida y fácilmente. Forma una gelatina no abrasiva altamente concentrada, absorbe 700 veces su peso en agua.

Aumenta la penetración y la lubricación. Mantiene sus características (gelatinosa) bajo presión, maximiza el uso del compresor de aire para la perforación así como de la barrena.

Mezcla y aplicación

Arigel se debe mezclar con agua, de 1/4 a 1/2 kilo por 378.5 litros de agua.

A.9. HYDRAUL EZ

Descripción

Es una arcilla bentonítica sódica que se tamiza en malla de 200. De alto rendimiento, cuenta

con un aditivo especial diseñado para mantener la integridad de la perforación en formaciones geológicas inestables.

Uso recomendado

Hydraul Ez fue especialmente diseñado para trabajar en ángulo y horizontalmente en la perforación de pozos. Puede ser usado en todos los tipos de agua y de terreno, con máquina rotaria.

Características

- Rápido mezclado
- Concentrado para alto rendimiento
- Se estabiliza con el tiempo
- Forma una costra delgada como filtro en formaciones inestables
- Mantiene la integridad del pozo
- Elimina los problemas de las arcillas en la perforación

Mezcla y aplicación

Las proporciones de mezcla están basadas en agua dulce. La pureza del agua puede afectar el rendimiento de la bentonita.

Hydraul Ez. Las proporciones en kilogramos por 378.5 litros de agua son:

| | |
|-----------------------------|----------------|
| Norma | 13.6 a 22.7 kg |
| Arena y grava | 22.7 a 34.0 kg |
| Control de pérdida de flujo | 34.0 a 36.3 kg |

A.10. REL PAC

Descripción

Rel Pac es un polímero granulado, no fermentante, diseñado para mejorar la suspensión del filtrado de la capa o costra, así como de las propiedades de la bentonita y la perforación del terreno, incrementando el rendimiento.

Uso recomendado

Diseñado para usarse en terrenos perforados con rotaria, donde la alta viscosidad es necesaria para detener las paredes, dadas las características del terreno.

Características

- Estabiliza sensiblemente el agua de la formación
- Reduce la presión de la bomba y la vibración de la bomba al apriete
- Impide el abundamiento, protege la barrena dentro del terreno y la barra (sarta); limpia la formación.
- Previene excelentemente el fluido y controla la bentonita en el terreno sistemáticamente. Se mezcla con agua dulce o salada
- Sus ingredientes son 100 por ciento activos
- No produce o causa deterioro alguno

Mezcla y aplicación

Rel Pac se mezcla en varias proporciones para su aplicación:

- Adicionar a agua dulce o salada
0.9 a 1.8 kg por 378.5 L de agua
- Adicionar al lodo bentonítico 0.46 a

0.9 kg por 378.5 L de lodo

- Adicionar al sistema de aire agua
0.46 a 0.9 kg por 378.5 L de líquido

A.11. PREMIUM GEL API BENTONITA

Descripción

Premium Gel es un polvo que pasa en malla 200. Cumple con las especificaciones como fluido de perforación de la API núm. 13 A

Uso recomendado

Se puede utilizar con diferentes tipos de agua dulce, como lodo de perforación. Eleva los sólidos donde se desee.

Características

Rápido y fácil de mezclar. Estabiliza la perforación. Enfría y lubrica la perforación. Remueve los cortes.

Mezcla y aplicación

La proporción se debe mezclar con agua dulce. La pureza del agua puede afectar el rendimiento de la bentonita.

Premium Gel se mezcla en la siguiente proporción por cada 378.5 litros de agua:

| | |
|-------------------------------|----------------|
| Materiales granulares gruesos | 13.6 a 22.7 kg |
| Control de fluido | 22.7 a 31.8 kg |
| Condiciones normales | 31.8 a 36.3 kg |

A.12. SÚPER GEL X BENTONITA DE ALTO RENDIMIENTO

Descripción

Súper Gel X es un talco que pasa a través de la malla 200 de alta viscosidad. Da un mejor rendimiento la combinación de sodio y bentonita, se puede usar en condiciones apropiadas con agua dulce.

Recomendaciones para usarse

Se puede utilizar en cualquier tipo de agua, como lodo de perforación.

Características

Alta concentración de máximo rendimiento, rápido y fácil de mezclar, reduce los sólidos e incrementa y eleva la fuerza. Remueve los cortes (ripio) de perforación. Entra y lubrica la barrena. Estabiliza la perforación.

Mezcla y aplicación

El material es de alto rendimiento usando agua dulce. La pureza del agua puede afectar el rendimiento.

Las proporciones de mezcla de Súper Gel X, en kg por 378.5 litros de agua son:

| | |
|----------------------|----------------|
| Condiciones normales | 6.8 a 11.3 kg |
| Arenas y gravas | 11.3 a 15.9 kg |
| Control de fluido | 15.9 a 18.1 kg |

A.13. VERSA FOAM DRILLING FOAM

Descripción

Versa Foam es un agente líquido generador de espuma biodegradable para uso en agua dulce o salada en perforación rotaria con aire.

Uso recomendado

Puede ser usado en perforación rotaria seca o mezclado con agua para formar espuma.

Características

- Fácil de mezclar con agua dulce y salada
- Alta concentración para rendimiento máximo
- Reduce el consumo de agua
- Lubrica y enfría, mejorando la penetración
- Elimina los recortes del pozo
- Reduce la presión hidrostática
- Suprime la formación de partículas (polvo) en perforación seca con aire

Mezcla y aplicación

La añadidura de 0.11 a 0.23 kg, de Arigel por cada 378.5 litros de mezcla de Versa Foam, u otro agente, produce un excelente generador de espuma. Al mezclarse es conveniente usar una corriente de aire.

Las proporciones de mezcla de Versa Foam son:

| | |
|--|---|
| Para eliminar polvo en perforación seca | 0.24 - 0.47 L en flujo de aire |
| Perforación con espumas | 3.8 - 7.6 L por 378.5 litros de agua |

A.14. INSTA PAC 425

Descripción

Insta Pac no es fermentable, es un polímero concentrado líquido, diseñado para una mezcla rápida en campo.

Insta Pac puede ser utilizado como un fluido de perforación en ciertas formaciones de fluidos y como aditivo en lodos de perforación para incrementar la viscosidad y las pérdidas de fluido.

Uso recomendado

Diseñado para uso en lodos de perforación rotaria para reducir pérdidas de fluido en formaciones arcillosas. El producto inhibe la hidratación de formaciones arcillosas. Sensible al agua.

Características

- Mezclado rápido y fácil
- Concentrado de máximo rendimiento
- Estable a altas y bajas temperaturas
- Reduce las pérdidas de fluidos en la formación
- Reduce la presión de la bomba y la torsión
- Incrementa la vida de la bomba y la velocidad
- Control de expansión de las arcillas de la formación

Mezcla y aplicación

Insta Pac se puede preparar mezclando agua con carbonato para tener un pH de 7.0.

A.15. VARIFLO

Descripción

Variflo es un polímero orgánico tipo goma. Se usa en perforación con agua dulce o salada.

Recomendado

Diseñado para perforación rotaria y perforación con diamante.

Características

- Rápido y fácil de mezclar con agua dulce o salada
- Bajo en suspensión de sólidos
- Rendimiento de 8 a 10 veces más que la bentonita
- Remueve fácilmente los cortes (recortes)
- Enfría y lubrica la barrena
- Se deshace naturalmente

Mezcla y aplicación

Para mejores resultados, el producto se debe agregar lentamente en la mezcladora.

La proporción de Variflo en kg por 378.5 litros de agua:

| | |
|----------------------|--------------|
| Condiciones normales | 0.9 a 2.3 kg |
| En gravas o arenas | 1.8 a 2.7 kg |

A.16. CIS GRANULAR

Descripción

La bentonita granular se compone de arcilla bentonítica seca, disponible en varios tamaños para el caso de usarse como sellador de ademe, de pozos abandonados y para sellar estructuras del terreno.

Uso recomendado: puede ser usado como sellador, como controlador de pérdida de fluido o como aditivo en sistemas de perforación rotacional con lodos.

Características

- Es un buen sellador
- Se mezcla con facilidad
- No se consolida o quiebra
- Se puede rehidratar y reexpandir

- Sellador de perforaciones poco profundas
- Aditivo para control de pérdida del fluido.
- Sellador de estructura del terreno

A.17. VOLCLAY GROUT

Descripción

Volclay Grout está fabricado con sólidos de bentonita de dos componentes, diseñados para reemplazar lechadas de cemento o de cemento bentonita para sellar el anillo del pozo.

Uso recomendado: Para sellar todo tipo de pozo, en los que se use cemento o cemento bentonita.

Características

- Baja permeabilidad, con pruebas de laboratorio en el rango de 1×10^{-7} a 1×10^{-8} cm/s
- No daña el entubado del pozo, no genera calor durante el mezclado
- Permanece flexible, mantiene su consistencia en el tiempo y puede ser rehidratado
- Es físicamente estable y no fluye a través del suelo altamente permeable
- Su durabilidad es mayor a la de los lechados de polímeros bentoníticos
- Puede ser colocado con tubos, asegurando una aplicación consistente y uniforme

Mezcla y aplicación

Volclay puede ser preparado en un mezclador de lechada o con un sistema rotacional de lodos.

Se añaden 22.7 kg de Volclay en 87.1 litros de agua, después se añade la bolsa de 0.9 litros de iniciador. Se debe pasar la mezcla en una balanza de lodos.

A.18. VOLCLAY CHIPS

Descripción

Volclay Chips son virutas secas naturales de tipo bentonítico disponibles en dos tamaños: grueso (de 3/8" a 3/4") y medio (de 1/4" a 3/8"). El producto está diseñado para sellar perforaciones poco profundas.

Uso recomendado: Para sellar pozos poco profundos, pozos abandonados, para aislar la lechada de bentonita con la del cemento.

Características

- Es químicamente estable
- Es un sellador de sólidos arcillosos
- Previene la infiltración de contaminación a partir de la superficie
- Es un sellador flexible permanente
- Puede ser usado para sellar perforaciones abandonadas, tubos, conductores y barrenos sísmicos

Mezcla y aplicación

El producto debe ser filtrado antes de aplicarse. Debe ser colado lentamente en el pozo para que se eviten puentes. No se recomienda para profundidades que excedan los 30 m.

B

TABLAS COMPARATIVAS DE MÉTODOS DE PERFORACIÓN

Nota aclaratoria:

Este anexo está compuesto por 28 tablas a manera de arreglos matriciales, en las que se muestran las condiciones diversas de perforación y el comportamiento de cada uno de los métodos de perforación tratados en el libro.

El objetivo del anexo es proporcionar al lector un criterio de selección de los métodos de perforación, y de ningún modo, tratar de condicionarla, dado que no se incluyen en las tablas otros factores inherentes al usuario, como por ejemplo, los recursos económicos con los que cuenta para el desarrollo del proyecto.

Tabla 1

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; Saturado; fluidos de perforación penetran en la formación; diámetro de ademe 2"; profundidad total del pozo de 4.5 a 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | Total |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|---|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para pre-servar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | 1 | 1 | 4 | 10 | 1 | 5 | 1 | 7 | 30 |
| Percusión - chorro | 1 | 1 | 5 | 10 | 3 | 1 | 1 | 1 | 23 |
| Taladro sólido | 3 | 3 | 2 | 9 | 7 | 4 | 8 | 1 | 37 |
| Taladro hueco | 8 | 9 | 8 | 9 | 8 | 8 | 8 | 9 | 67 |
| Rotaria con lodo de perforación | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 4 | 10 | 4 | 67 |
| Rotaria con aire | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire y ademe clavado | 8 | 5 | 7 | 4 | 9 | 8 | 10 | 9 | 60 |
| Rotaria con doble tubería | 10 | 8 | 7 | 1 | 10 | 9 | 10 | 8 | 63 |
| Percusión cable y herramienta | 9 | 10 | 5 | 7 | 5 | 10 | 10 | 10 | 66 |

Tabla 2

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; Saturado; fluidos de perforación penetran en la formación; diámetro de ademe 2"; profundidad total del pozo de 4.5 a 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | Total |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con lodo de perforación | 10 | 1 | 10 | 10 | 9 | 5 | 10 | 6 | 61 |
| Rotaria con aire | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire y ademe clavado | 8 | 6 | 5 | 4 | 7 | 10 | 10 | 10 | 60 |
| Rotaria con doble tubería | 10 | 10 | 8 | 1 | 10 | 10 | 10 | 10 | 69 |
| Percusión cable y herramienta | 9 | 8 | 5 | 7 | 4 | 9 | 10 | 10 | 62 |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 3

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; Saturado; fluidos de perforación penetran en la formación; diámetro de ademe 2" a 8"; profundidad total del pozo de 4.5 a 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | Total |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | 1 | 1 | 2 | 10 | 1 | 5 | 1 | 4 | 25 |
| Percusión - chorro | 1 | 1 | 3 | 10 | 3 | 1 | 1 | 1 | 21 |
| Taladro sólido | 3 | 3 | 2 | 9 | 7 | 4 | 2 | 2 | 32 |
| Taladro hueco | 5 | 10 | 8 | 9 | 9 | 8 | 5 | 5 | 59 |
| Rotaria con lodo de perforación | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 4 | 10 | 5 | 69 |
| Rotaria con aire | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire y ademe clavado | 8 | 5 | 5 | 4 | 9 | 9 | 10 | 10 | 60 |
| Rotaria con doble tubería | 10 | 8 | 8 | 1 | 8 | 10 | 8 | 8 | 61 |
| Percusión cable y herramienta | 9 | 10 | 5 | 7 | 5 | 9 | 10 | 10 | 65 |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 4

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; Saturado; fluidos de perforación penetran en la formación; diámetro de ademe 2" a 8"; profundidad total del pozo de más 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | Total |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con lodo de perforación | 10 | 4 | 10 | 10 | 10 | 6 | 10 | 6 | 66 |
| Rotaria con aire | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire y ademe clavado | 7 | 8 | 5 | 4 | 7 | 9 | 10 | 10 | 60 |
| Rotaria con doble tubería | 10 | 10 | 6 | 1 | 6 | 10 | 7 | 8 | 58 |
| Percusión cable y herramienta | 9 | 8 | 3 | 7 | 4 | 9 | 10 | 10 | 60 |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 5

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; Saturado; fluidos de perforación penetran en la formación; diámetro de ademe de más 8"; profundidad total del pozo de 4.5 a 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | Total |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con lodo de perforación | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 6 | 10 | 3 | 67 |
| Rotaria con aire | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire y ademe clavado | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con doble tubería | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión cable y herramienta | 10 | 10 | 6 | 7 | 4 | 10 | 10 | 10 | 67 |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 6

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; Saturado; fluidos de perforación penetran en la formación; diámetro de más de 8"; profundidad total del pozo de 4.5 a 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | Total |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con lodo de perforación | 10 | 6 | 10 | 10 | 10 | 5 | 9 | 6 | 66 |
| Rotaria con aire | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire y ademe clavado | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con doble tubería | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión cable y herramienta | 10 | 10 | 4 | 7 | 2 | 10 | 10 | 10 | 63 |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 7

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; Saturado; fluidos de perforación penetran en la formación; diámetro de ademe 2"; profundidad total del pozo de 4.5 a 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | Total |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | 1 | 1 | 4 | 10 | 1 | 5 | 1 | 7 | 30 |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | 8 | 10 | 10 | 10 | 8 | 8 | 8 | 7 | 69 |
| Rotaria con lodo de perforación | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire y ademe clavado | 8 | 5 | 8 | 5 | 10 | 9 | 10 | 10 | 65 |
| Rotaria con doble tubería | 10 | 8 | 8 | 1 | 8 | 9 | 10 | 10 | 64 |
| Percusión cable y herramienta | 10 | 10 | 8 | 8 | 2 | 10 | 10 | 10 | 68 |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 8

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; Saturado; fluidos de perforación no penetran en la formación; diámetro de ademe 2"; profundidad total del pozo de más de 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | Total |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con lodo de perforación | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire y ademe clavado | 8 | 6 | 10 | 7 | 10 | 8 | 10 | 10 | 69 |
| Rotaria con doble tubería | 10 | 10 | 9 | 4 | 10 | 10 | 10 | 9 | 72 |
| Percusión cable y herramienta | 9 | 6 | 7 | 10 | 6 | 8 | 10 | 10 | 66 |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 9

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; Saturado; fluidos de perforación no penetran en la formación; diámetro de ademe 2" a 8"; profundidad total del pozo de 4.5 a 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | Total |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | 1 | 1 | 2 | 10 | 1 | 5 | 1 | 4 | 25 |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | 1 | 1 | 2 | 9 | 3 | 4 | 2 | 2 | 24 |
| Taladro hueco | 5 | 10 | 10 | 9 | 10 | 8 | 6 | 6 | 64 |
| Rotaria con lodo de perforación | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire y ademe clavado | 9 | 5 | 8 | 4 | 9 | 10 | 10 | 10 | 65 |
| Rotaria con doble tubería | 9 | 8 | 8 | 1 | 9 | 10 | 6 | 6 | 57 |
| Percusión cable y herramienta | 10 | 10 | 7 | 7 | 5 | 9 | 10 | 10 | 68 |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 10

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; Saturado; fluidos de perforación no penetran en la formación; diámetro de ademe 2" a 8"; profundidad total del pozo de más de 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | Total |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con lodo de perforación | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire y ademe clavado | 9 | 8 | 10 | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | 74 |
| Rotaria con doble tubería | 10 | 10 | 9 | 4 | 10 | 10 | 9 | 8 | 70 |
| Percusión cable y herramienta | 9 | 7 | 6 | 10 | 8 | 9 | 10 | 10 | 69 |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 11

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; Saturado; fluidos de perforación no penetran en la formación; diámetro de más de 8"; profundidad total del pozo de 4.5 a 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | Total |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con lodo de perforación | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire y ademe clavado | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con doble tubería | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión cable y herramienta | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 80 |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 12

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; saturado; fluidos de perforación no penetran en la formación; diámetro de más de 8"; profundidad total del pozo de más de 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | Total |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con lodo de perforación | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire y ademe clavado | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con doble tubería | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión cable y herramienta | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 80 |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 13

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; no saturado; fluidos de perforación penetran en la formación; diámetro de 2"; profundidad total del pozo más de 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | Total |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con lodo de perforación | 10 | 2 | 10 | 10 | 10 | 4 | 10 | 5 | 61 |
| Rotaria con aire | 5 | 5 | 8 | 8 | 7 | 8 | 10 | 4 | 55 |
| Rotaria con aire y ademe clavado | 9 | 9 | 6 | 4 | 7 | 9 | 10 | 10 | 64 |
| Rotaria con doble tubería | 10 | 10 | 6 | 1 | 8 | 10 | 10 | 9 | 64 |
| Percusión cable y herramienta | 9 | 5 | 5 | 7 | 3 | 8 | 10 | 7 | 54 |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 14

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; no saturado; fluidos de perforación penetran en la formación; diámetro de 2" a 8"; profundidad total del pozo de 4.5 a 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | Total |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | 1 | 1 | 1 | 10 | 2 | 5 | 1 | 4 | 25 |
| Percusión - chorro | 1 | 1 | 1 | 10 | 3 | 1 | 1 | 1 | 19 |
| Taladro sólido | 3 | 10 | 10 | 9 | 8 | 8 | 6 | 5 | 59 |
| Taladro hueco | 7 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 | 8 | 8 | 72 |
| Rotaria con lodo de perforación | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 4 | 10 | 5 | 68 |
| Rotaria con aire | 5 | 5 | 8 | 8 | 8 | 7 | 6 | 4 | 51 |
| Rotaria con aire y ademe clavado | 10 | 8 | 6 | 4 | 8 | 9 | 10 | 10 | 65 |
| Rotaria con doble tubería | 10 | 9 | 6 | 1 | 8 | 9 | 10 | 9 | 62 |
| Percusión cable y herramienta | 9 | 10 | 4 | 7 | 7 | 9 | 10 | 10 | 66 |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 15

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; no saturado; fluidos de perforación penetran en la formación; diámetro de 2" a 8"; profundidad total del pozo de 4.5 a 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | Total |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | 1 | 1 | 1 | 10 | 2 | 5 | 1 | 4 | 25 |
| Percusión - chorro | 1 | 1 | 1 | 10 | 3 | 1 | 1 | 1 | 19 |
| Taladro sólido | 3 | 10 | 10 | 9 | 8 | 8 | 6 | 5 | 59 |
| Taladro hueco | 7 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 | 8 | 8 | 72 |
| Rotaria con lodo de perforación | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 4 | 10 | 5 | 68 |
| Rotaria con aire | 5 | 5 | 8 | 8 | 8 | 7 | 6 | 4 | 51 |
| Rotaria con aire y ademe clavado | 10 | 8 | 6 | 4 | 8 | 9 | 10 | 10 | 65 |
| Rotaria con doble tubería | 10 | 9 | 6 | 1 | 8 | 9 | 10 | 9 | 62 |
| Percusión cable y herramienta | 9 | 10 | 4 | 7 | 7 | 9 | 10 | 10 | 66 |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 16

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; no saturado; fluidos de perforación penetran en la formación; diámetro de más de 8"; profundidad total del pozo de 4.5 a 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | Total |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con lodo de perforación | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 6 | 10 | 4 | 70 |
| Rotaria con aire | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire y ademe clavado | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con doble tubería | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión cable y herramienta | 8 | 10 | 6 | 7 | 5 | 10 | 10 | 10 | 66 |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 17

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; no saturado; fluidos de perforación penetran en la formación; diámetro de más de 8"; profundidad total del pozo de más de 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | Total |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con lodo de perforación | 10 | 8 | 10 | 10 | 10 | 6 | 8 | 4 | 66 |
| Rotaria con aire | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire y ademe clavado | NA | NN | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con doble tubería | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión cable y herramienta | 8 | 10 | 6 | 7 | 4 | 10 | 10 | 10 | 65 |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 18

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; no saturado; fluidos de perforación no penetran en la formación; diámetro de 2"; profundidad total del pozo de 4.5 a 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | Total |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | 1 | 1 | 7 | 10 | 6 | 5 | 1 | 4 | 35 |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 8 | 9 | 5 | 70 |
| Taladro hueco | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 79 |
| Rotaria con lodo de perforación | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire | 7 | 5 | 8 | 8 | 8 | 7 | 9 | 4 | 56 |
| Rotaria con aire y ademe clavado | 10 | 8 | 6 | 4 | 6 | 9 | 10 | 10 | 63 |
| Rotaria con doble tubería | 10 | 9 | 6 | 1 | 9 | 9 | 10 | 10 | 64 |
| Percusión cable y herramienta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 19

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; no saturado; fluidos de perforación no penetran en la formación; diámetro de 2"; profundidad total del pozo de más de 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | Total |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con lodo de perforación | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire | 7 | 7 | 10 | 10 | 10 | 7 | 10 | 4 | 65 |
| Rotaria con aire y ademe clavado | 10 | 9 | 8 | 8 | 9 | 9 | 10 | 10 | 73 |
| Rotaria con doble tubería | 10 | 10 | 8 | 4 | 9 | 10 | 10 | 8 | 69 |
| Percusión cable y herramienta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 20

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; no saturado; fluidos de perforación no penetran en la formación; diámetro de más de 8"; profundidad total del pozo de 4.5 a 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | Total |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | 1 | 1 | 1 | 10 | 2 | 5 | 1 | 4 | 25 |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | 3 | 10 | 10 | 10 | 8 | 8 | 6 | 3 | 58 |
| Taladro hueco | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 8 | 8 | 73 |
| Rotaria con lodo de perforación | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire | 5 | 5 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 3 | 52 |
| Rotaria con aire y ademe clavado | 10 | 8 | 6 | 4 | 6 | 9 | 10 | 10 | 63 |
| Rotaria con doble tubería | 10 | 9 | 6 | 1 | 6 | 9 | 8 | 3 | 52 |
| Percusión cable y herramienta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 21

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado;no saturado; fluidos de perforación no penetran en la formación; diámetro de más de 8"; profundidad total del pozo de 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | Total |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | 1 | 1 | 1 | 10 | 2 | 5 | 1 | 4 | 25 |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | 3 | 10 | 10 | 10 | 8 | 8 | 6 | 3 | 58 |
| Taladro hueco | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | 1 | 8 | 8 | 73 |
| Rotaria con lodo de perforación | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire | 5 | 5 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 52 | NA |
| Rotaria con aire y ademe clavado | 10 | 8 | 6 | 4 | 6 | 9 | 10 | 10 | 63 |
| Rotaria con doble tubería | 10 | 9 | 6 | 1 | 6 | 9 | 8 | 3 | 52 |
| Percusión cable y herramienta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 22

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; no saturado; fluidos de perforación no penetran en la formación; diámetro de más de 8"; profundidad total del pozo de 4.5 a 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | Total |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con lodo de perforación | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 80 |
| Rotaria con aire y ademe clavado | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con doble tubería | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión cable y herramienta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 23

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material no consolidado; no saturado; fluidos de perforación no penetran en la formación; diámetro de más de 8"; profundidad total del pozo de más de 45 m.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | Total |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con lodo de perforación | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 80 |
| Rotaria con aire y ademe clavado | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con doble tubería | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión cable y herramienta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 24

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material consolidado; fluidos de perforación penetran en la formación; diámetro de ademe de 4" o más.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | Total |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con lodo de perforación | 7 | 6 | 8 | 10 | 8 | 7 | 10 | 7 | 63 |
| Rotaria con aire | 8 | 9 | 10 | 9 | 10 | 9 | 10 | 10 | 75 |
| Rotaria con aire y ademe clavado | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con doble tubería | 10 | 10 | 7 | 1 | 10 | 10 | 10 | 10 | 68 |
| Percusión cable y herramienta | 8 | 7 | 5 | 6 | 4 | 7 | 10 | 8 | 55 |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 25

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material consolidado; fluidos de perforación penetran en la formación; diámetro de ademe de 8" o mayores.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | Total |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con lodo de perforación | 9 | 6 | 8 | 10 | 8 | 6 | 10 | 7 | 64 |
| Rotaria con aire | 8 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 77 |
| Rotaria con aire y ademe clavado | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con doble tubería | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión cable y herramienta | 10 | 9 | 5 | 8 | 5 | 9 | 10 | 9 | 65 |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 26

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material consolidado; fluidos de perforación no penetran en la formación; diámetro de ademe 4" o menores.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | Total |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con lodo de perforación | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire | 8 | 8 | 10 | 10 | 10 | 8 | 10 | 10 | 74 |
| Rotaria con aire y ademe clavado | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con doble tubería | 10 | 10 | 7 | 1 | 10 | 10 | 10 | 10 | 68 |
| Percusión cable y herramienta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 27

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material consolidado; fluidos de perforación no penetran en la formación; diámetro de ademe de 4" o mayores.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | Total |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con lodo de perforación | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 80 |
| Rotaria con aire y ademe clavado | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con doble tubería | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión cable y herramienta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

Tabla 28

Condiciones hidrológicas generales y requisitos para el diseño de pozo

Material consolidado; fluidos de perforación no penetran en la formación; diámetro de ademe de 4" o mayores.

| Método de perforación | Criterios para la evaluación de los métodos de perforación | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|-----------------------|-------|-----------------------------|---|--|---|---|-------|
| | Versatilidad | Seguridad de muestreo | Costo | Disponibilidad en el equipo | Tiempo relativo de perforación, instalación y desarrollo del pozo | Capacidad para preservar las condiciones naturales | Capacidad para instalar diseño del pozo | Facilidad relativa para terminar el pozo y desarrollo | Total |
| Barrenos naturales | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pozos punta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión - chorro | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro sólido | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Taladro hueco | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con lodo de perforación | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con aire | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 80 |
| Rotaria con aire y ademe clavado | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Rotaria con doble tubería | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Percusión cable y herramienta | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |

Notas:

NA = No aplicable

Calificación de 1 a 10

C

HERRAMIENTAS DE CORTE

Nota aclaratoria:

Se proporcionan tablas sobre las características físicas más importantes de las herramientas de corte empleadas para la perforación de pozos de agua. Estas tablas cubren tanto barrenas tricónicas, como martillos de fondo y

una guía para seleccionar el tipo de corona más adecuado para perforar y obtener muestras de las formaciones perforadas, de acuerdo al tipo de maquinaria empleada. Al igual que los anteriores anexos, el objetivo es de carácter propositivo y no pretende influir la decisión del usuario.

| Modelo | Tipo | Diámetro de perforación mm | Martillo | | | Tubería | Consumo | | |
|--------|------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|---------|--------|---------------------|
| | | | Peso kg | Diámetro mm | Longitud mm | Diámetro mm | 7 ATM | 12 ATM | 17 ATM |
| | | | | | | | | | m ³ /min |
| 65 | 65.ASS | 67 a 75 | 13 | 57 | 815 | 57 | 4 | | |
| 3 | 80.H7 | 87 a 92 | 20 | 73 | 865 | 70 | 5 | | |
| | S.351 | 87 a 92 | 24 | 76 | 1086 | 70 | 6 | 8 | |
| | 80.KS7* | 87 a 92 | 20 | 73 | 870 | 70 | 5 | | |
| 4 | 100.H7 | 106 a 135 | 33 | 93 | 905 | 90 | 6 | | |
| | S.451 | 106 a 135 | 40.5 | 96 | 1120 | 90 | 7.5 | 11.5 | 16 |
| | ADEC.4 | 106 a 135 | 40 | 96 | 1180 | 90 | 7 | 10 | 14 |
| | 100.KS7* | 106 a 135 | 33 | 93 | 910 | 90 | 6 | | |
| | S.451.E* | 106 a 135 | 41 | 96 | 1120 | 90 | 7.5 | 11.5 | 16 |
| 5 | S.551 | 130 a 150 | 83 | 111 | 1590 | 108 | 8.5 | 14 | 19.5 |
| | S.552 | 130 a 150 | 68 | 111 | 1270 | 108 | 8.5 | 14 | 19.5 |
| | ADEC.5 | 130 a 150 | 85 | 118/111 | 1455 | 108 | 7.5 | 12.5 | 17.5 |
| | S.551.E* | 130 a 150 | 84 | 111 | 1590 | 108 | 8.5 | 14 | 19.5 |
| | S.552.E* | 130 a 150 | 69 | 111 | 1270 | 108 | 8.5 | 14 | 19.5 |
| 6 | S.651 | 165 a 235 | 150 | 148/152 | 1670 | 120 a 140 | 11 | 18 | 25 |
| | S.652 | 165 a 235 | 130 | 148/152 | 1400 | 120 a 140 | 11 | 18 | 25 |
| | ADEC.6 | 165 a 235 | 150 | 148/152 | 1494 | 120 a 140 | 10 | 16 | 23 |
| | S.651.E* | 165 a 235 | 151 | 148/152 | 1670 | 120 a 140 | 11 | 18 | 25 |
| | S.652.E* | 165 a 235 | 131 | 148/152 | 1400 | 120 a 140 | 11 | 18 | 25 |
| 10 | S.1051 | 250 a 305 | 400 | 205/220 | 2100 | 200 a 280 | 17 | 28 | 34 |
| | S.1051.G | 250 a 305 | Según diámetro de perforación | | | | 17 | 28 | 34 |
| | S.1051.E* | 250 a 305 | 400 | 205/220 | 2100 | 200 a 280 | 17 | 28 | 34 |
| | S.1051.GE* | 250 a 305 | Según diámetro de perforación | | | | 17 | 28 | 34 |

* Martillos con inyectores de agua

Todos los martillos pueden ser equipados con una válvula que permite la perforación bajo el nivel del agua

Clasificación de barrenas tricónicas fabricadas por la compañía Hughes Tool

| Tipo de cor- tante | serie | formaciones | tipos | características | | | | | | | | | | |
|------------------------|-------|---|-------|-----------------|--------------------|----------------------------|--|---|--|--|-----------------|-----------|-----|--|
| | | | | Estandar [1] | Calibre "T" [2] | Inserto del calibre [3] | Cojinete de rodillos sellado [4] | Cojinete de sellado y calibre [5] | Cojinete de fricción sellado [6] | Cojinete de fricción sellado [7] | Direccional [8] | Otros [9] | | |
| | 1 | Formaciones blandas y con baja fuerza compresiva y alta durabilidad | 1 | OSC 3A | | | X3A | | | J1 | | | | |
| | | | 2 | OSC 3 | | | X3 | | | J2 | | | | |
| | | | 3 | OSC 10 | | | X1G | | XDG | J3 | | | | |
| | | | 4 | | | | | | | | | | | |
| Dientes de acero | 2 | Formaciones entre medianas y media duras con alta fuerza | 1 | OWV/OW4 | | | | | XDV | J4 | | | | |
| | | | 2 | WO | | | | | | | | | | |
| | | | 3 | | | | | | | | | | | |
| | | | 4 | | | | | | | | | | | |
| | 3 | Formaciones duras, semiabrasivas o abrasivas | 1 | W7 | | | | | | J7 | | | | |
| | | | 2 | W7R2 | | | | | | | | | | |
| | | | 3 | | | | | | | | | | | |
| | | | 4 | | | | | | | J8 | | JD8 | | |
| | 4 | Para uso futuro | 1 | | | | | | | | | | | |
| | | | 2 | | | | | | | | | J11 | | |
| | | | 3 | | | | | | | | | | | |
| | | | 4 | | | | | | | | | | J22 | |
| | 5 | Formaciones entre blandas y medianas con alta fuerza compresiva | 1 | | | | | | | | | | | |
| | | | 2 | | | | | | | | | | | |
| | | | 3 | | | | | X33 | | | | J33 | | |
| | | | 4 | | | | | | | | | | | |
| Barrena de insertos | 6 | Formaciones medias duras con alta fuerza compresiva | 1 | | | | | HH44 | | X44 | | J44 | | |
| | | | 2 | | | | | | | | | J55R | | |
| | | | 3 | | | | | HH55 | | | | J55R | | |
| | | | 4 | | | | | | | | | J77 | | |
| | 7 | Formaciones duras, semiabrasivas o abrasivas | 1 | | | | | HH77 | | | | | | |
| | | | 2 | | | | | A88/RG7AJ | | | | | | |
| | | | 3 | | | | | | | | | | | |
| | | | 4 | | | | | | | | | | | |
| | 8 | Formaciones su- mamente duras y abrasivas | 1 | | | | | | | | | J99 | | |
| | | | 2 | | | | | | | | | | | |
| | | | 3 | | | | | | | | | | | |
| | | | 4 | | | | | | | | | | | |

Clasificación de barrenas tricónicas fabricadas por la compañía Smith Tool

| Tipo de cor- tante | serie | formaciones | tipos | características | | | | | | | | | | |
|------------------------|-------|---|-------|-----------------|--------------------|----------------------------|--|---|--|--|-----------------|-----------|---------|-----------|
| | | | | Estandar [1] | Calibre "T" [2] | Inserto del calibre [3] | Cojinete de rodillos sellado [4] | Cojinete de sellado y calibre [5] | Cojinete de fricción sellado [6] | Cojinete de fricción sellado [7] | Direccional [8] | Otros [9] | | |
| | 1 | Formaciones blandas y con baja fuerza compresiva y alta durabilidad | 1 | DS | | | SDS | | | | | | | MDSJH |
| | | | 2 | DT | DTT | | SDT | | | FDT | | | DJ/8HDJ | |
| | | | 3 | DG | DGT | DGH | SDG | SDGH | | FDG | | | | SDGRE |
| | | | 4 | K2 | | K2H | | | | | | | | |
| Dientes de acero | 2 | Formaciones entre medianas y media duras con alta fuerza | 1 | V2 | | | SV | | SVH | | | | | |
| | | | 2 | | | | | | | | | | | |
| | | | 3 | T2 | | L4H | ST2 | | | | | | | |
| | | | 4 | | | | | | | | | | | |
| | 3 | Formaciones duras, semiabrasivas o abrasivas | 1 | L4 | | | SL4 | | SL4H | | | | | L4AP-L4HP |
| | | | 2 | | | | | | | | | | | |
| | | | 3 | | | | | H77S | | | | | | |
| | | | 4 | | | | | | | | | | | |
| | 4 | Para uso futuro | 1 | | | | | | | | | | | |
| | | | 2 | | | | | | | | | | | |
| | | | 3 | | | | | | | | | | | |
| | | | 4 | | | | | | | | | | | |
| | 5 | Formaciones entre blandas y medianas con alta fuerza compresiva | 1 | | | | | 2JS | | F2 | | | | A1 |
| | | | 2 | | | | | | | | | | | |
| | | | 3 | | | | | 3JS | | F3 | | | | |
| | | | 4 | | | | | | | | | | | |
| Barrena de insertos | 6 | Formaciones medias duras con alta fuerza compresiva | 1 | | | | | 4JS | | F4 | | FD4 | | 4JA |
| | | | 2 | | | | | 5JS | | F5 | | | | 5JA |
| | | | 3 | | | | | | | F57 | | | | |
| | | | 4 | | | | | | | | | | | |
| | 7 | Formaciones duras, semiabrasivas o abrasivas | 1 | | | | | | | | | | | |
| | | | 2 | | | | | | | | | | | 6JA |
| | | | 3 | | | | | | 7JS | | F7 | | | 7JA |
| | | | 4 | | | | | | | | | | | |
| | 8 | Formaciones su- mamente duras y abrasivas | 1 | | | | | | | | | | | |
| | | | 2 | | | | | | | | | | | |
| | | | 3 | | | | | | 9JS | | F9 | | | 9JA-9AP |
| | | | 4 | | | | | | | | | | | |

Clasificación de barrenas tricónicas fabricadas por la compañía Security Rock Bits

| Tipo de cor- tante | serie | formaciones | tipos | características | | | | | | | | |
|-----------------------|---|---|-------|-----------------|--------------------|----------------------------|--|---|--|--|-----------------|-----------|
| | | | | Estandar [1] | Calibre "T" [2] | Inserto del calibre [3] | Cojinete de rodillos sellado [4] | Cojinete de sellado y calibre [5] | Cojinete de fricción sellado [6] | Cojinete de fricción sellado [7] | Direccional [8] | Otros [9] |
| Dientes de acero | 1 | Formaciones blandas y con baja fuerza compresiva y alta durabilidad | 1 | S3S | | | | | | S335F | S3SJD | S3SJ4 |
| | | | 2 | S3 | S3T | S3TG | | | | S33F | S3JD | S3J4 |
| | | | 3 | S4 | S4T | S4TG | | | | S44F | | |
| | | | 4 | | | | | | | | DS DSS | |
| | 2 | Formaciones entre medianas y media duras con alta fuerza | 1 | M4N | | M4NG | | | | M44NF | | |
| | | | 2 | M4 | | M4SG | | | | | | |
| | | | 3 | M4L | | M4LG | | | | M44LF | DM | |
| | | | 4 | | | | | | | H77F | | |
| | 3 | Formaciones duras, semiabrasivas o abrasivas | 1 | H7 | H7T | H7TG | | | | | | |
| | | | 2 | | | | | H77S | | | | |
| | | | 3 | | | H7SG | | | | H77CF | | |
| | | | 4 | | | | | | | | | |
| 4 | Para uso futuro | 1 | | | | | | | | | | |
| | | 2 | | | | | | | | | | |
| | | 3 | | | | | | | | | | |
| | | 4 | | | | | | | | | | |
| 5 | Formaciones entre blandas y medianas con alta fuerza compresiva | 1 | | | | | | S84 | | S84F | | |
| | | 2 | | | | | | | | | | |
| | | 3 | | | | | | | S86F | | | |
| | | 4 | | | S8JA | | S88 | | S88F | D588 | | |
| 6 | Formaciones medias duras con alta fuerza compresiva | 1 | | | | | | | | M84F | | |
| | | 2 | | | M8JA | | M88 | | M88F/M89TF | | | |
| | | 3 | | | | | | | M89F | | | |
| | | 4 | | | | | | | | | | |
| 7 | Formaciones duras, semiabrasivas o abrasivas | 1 | | | | | | | | | | |
| | | 2 | | | | | | | | | | |
| | | 3 | | | | | | | | H84F | | |
| | | 4 | | | H8JA | | H88 | | | H88F | | |
| 8 | Formaciones su- mamente duras y abrasivas | 1 | | | H9JA | | H99 | | H99F | | | |
| | | 2 | | | | | | | | | | |
| | | 3 | | | H10JA | | H100 | | | H100F | | |
| | | 4 | | | | | | | | | | |

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Acuífero. Unidad geológica constituida por material saturado, permeable, del que se puede extraer agua en condiciones económicas.

Acuífero confinado. Acuífero limitado en sentido vertical por rocas impermeables y sometidas a una presión hidrostática superior a la atmosférica.

Acuífero libre. Acuífero que tiene su límite superior definido por el nivel freático sometido a la presión atmosférica.

Acuitardo. Formación geológica o grupo de formaciones o parte de ellas de baja permeabilidad, se encuentra saturada de agua, pero su capacidad para cederla es muy limitada.

Ademe ciego. Tubo cerrado lateralmente que no permite el paso del agua al interior del pozo. Revestimiento de las paredes del pozo, destinado a evitar su caída.

Ademe ranurado. Tubo que cuenta con aberturas de diversos tipos y tamaños destinadas a permitir el paso del agua proveniente del acuífero hacia el interior del pozo. Permite la estabilidad de las paredes del acuífero.

Aforo. Prueba en la que se bombea a caudal variable para establecer la cantidad óptima de agua que puede ser extraída de un pozo.

Anión. Ion con carga eléctrica negativa.

Arcilla. Material clástico en el que predominan los tamaños menores a 11256 mm.

Arreglo granulométrico. Distribución en por ciento y por tamaños de los gránulos que integran una muestra.

Azolve. Material sólido en suspensión proveniente del acuífero que se deposita en el interior del pozo.

Barrena. También llamada trépano, nombre que se le asigna a la herramienta de corte empleada al final de la tubería de perforación, incluye las tricónicas y las herramientas de dragado.

Bentonita. Arcilla plástica altamente coloidal, del grupo de las montmorillonitas, se caracteriza por aumentar varias veces su volumen al ponerse en contacto con el agua.

Caliza. Roca sedimentada formada por la precipitación de carbonato de calcio, principalmente en forma de calcita y pequeñas cantidades de impurezas arcillosas.

Capacidad específica. Relación entre el caudal extraído de un pozo y el descenso del nivel dinámico.

Carbonato. Compuesto formado por la precipitación orgánica o inorgánica, en una solución acuosa de calcio, magnesio o hierro (C03).

Catión. Ion con carga eléctrica positiva.

Cátodo. Electrodo cargado negativamente.

Caudal. Volumen de líquido que atraviesa una sección durante la unidad de tiempo

Caudal óptimo. Caudal al que se puede explotar un pozo de manera eficaz.

Cedazo. Ademe con aberturas de forma, tamaño y espaciado diseñado en función de las características del acuífero, que permite el paso del agua al interior del pozo.

Cono de abatimiento. Depresión del nivel freático, en forma de cono invertido, con el pozo como eje y ocasionado por la pérdida de carga del agua al fluir hacia el pozo. Define el área de influencia del pozo.

Contaminante. Sustancia o materia física, química, biológica o radiactiva, que estando presente en el agua, produce un efecto nocivo para la salud y el medio.

Desarrollo del pozo. Conjunto de actividades físicas o químicas tendientes a mejorar las con-

diciones hidráulicas de un pozo.

Descenso real del pozo. Diferencia entre el nivel dinámico y el estático.

Descenso teórico del pozo. Parte del descenso real del pozo que se origina por pérdidas de carga en el acuífero.

Eficiencia de pozo. Relación entre el descenso teórico y el descenso real, expresado en por ciento. La máxima eficiencia hidráulica de un pozo, en unas condiciones dadas, se obtiene cuando el producto del caudal por la capacidad específica es máximo.

Embudo de Marsh. Instrumento que se emplea para medir la viscosidad de los fluidos de perforación, por medio del tiempo en que tarda en pasar a través de él, un volumen determinado

Espacio anular. Espacio comprendido entre la pared de la perforación y el ademe del pozo. Frecuentemente aloja el filtro granular.

Estratigrafía. Parte de la Geología que trata del estudio de las unidades o formaciones geológicas, su origen, distribución espacial, forma de depósito y edad.

Filtro granular. Material granular redondeado, natural, de tamaños seleccionados especialmente para retener los gránulos de un acuífero.

Fluidos de perforación. Agua, agua con aditivos, aire o aire con espumantes, empleados en las labores de perforación rotatoria de pozos, para remover el corte del fondo, enfriar y limpiar la barrena, mantener estables las paredes del pozo y reducir la fricción entre las paredes del pozo y la herramienta de perforación.

Flujo laminar. Movimiento de un fluido en donde sus partículas fluyen en líneas paralelas a las paredes del ducto, sin interferir entre sí. Es característico del movimiento del agua subterránea.

Flujo turbulento. Movimiento de un líquido en el que las líneas de flujo se desplazan siguiendo trayectorias confusas y heterogéneas. Está asociado a velocidades mayores que en el laminar.

Gradiente hidráulico. Relación del cambio de carga por unidad de distancia en un flujo de agua.

Grava. Material clástico en el que predominan los tamaños superiores a 2 mm.

Incrustación. Proceso por medio del cual sustancias minerales precipitan en las aberturas del cedazo y el ademe y otras partes sumergidas del equipo de bombeo, obturando la entrada de agua y reduciendo su eficiencia. Se provocan a través de reacciones químicas o biológicas.

Ion. Átomo o conjunto de átomos cargados eléctricamente.

Limo. Material clástico en el que predominan los tamaños entre 1/16 y 1/256 mm.

Nivel dinámico. Cota del agua en un pozo al ser bombeado a un caudal dado.

Nivel estático. Nivel del agua en un pozo cuando no está afectado por el bombeo.

Nivel freático. Límite entre la zona de aireación y la de saturación. Este término se emplea solo en acuíferos libres.

Nivel piezométrico. Elevación que alcanza el agua en un pozo artesiano al conectar el acuífero con la atmósfera.

Oxidación. Reacción química de un elemento con oxígeno.

Partes por millón (ppm). Unidad de peso de un soluto por el peso de un millón de unidades de solvente.

Pérdida de fluido. Medida relativa de la cantidad de fluido de perforación que se pierde o infiltra a través de formaciones permeables, producto de presiones diferenciales que afectan al fluido.

Perforación a percusión. Sistema de perforación en el cual se fragmenta la roca por medio del golpeo de una herramienta pesada, extrayéndose el detritus con una cuchara.

Perforación rotaria con circulación directa. Sistema de perforación en el cual el fluido penetra al pozo por la tubería de perforación y el agujero.

Perforación rotaria con circulación inversa. Sistema de perforación en el cual el fluido penetra al pozo por el espacio anular entre la tubería de perforación y las paredes del pozo y asciende por el interior de la tubería.

Permeabilidad. Capacidad de un material para transmitir un fluido. Caudal de agua que se filtra a través de una sección de terreno de área unitaria, bajo la carga producida por un gradiente hidráulico unitario a una temperatura constante de 20° C.

Peso específico. Relación que existe entre el peso de un cuerpo y un volumen semejante de agua, al nivel del mar y a una temperatura de 4° C.

pH. Medida de la acidez o alcalinidad de una solución. Un pH de 7 indica una solución neutra. Abajo de 7 la solución es ácida y arriba de 7 es alcalina.

Contaminación. Niveles de concentraciones contaminantes tales que limitan el uso potencial del agua.

PVC (Cloruro de Polivinil). Termoplástico producido por la combinación de resina de PVC con varios tipos de estabilizadores, lubricantes y pigmentos, hecho para ser resistente y rígido.

Radio de influencia. Distancia radial entre el centro de un pozo de explotación y el punto más cercano en el que no se observan efectos de abatimiento del nivel estático o del piezométrico.

Rehabilitación. Conjunto de técnicas químicas y mecánicas encaminadas a elevar o restaurar la

eficiencia con que se desempeña un pozo.

Rocas carbonatadas. Rocas sedimentarias formadas por la precipitación y acumulación de carbonatos. Las más abundantes son la caliza y la dolomía.

Rocas clásticas. Rocas sedimentadas compuestas principalmente por fragmentos de roca de diferentes tamaños, erosionados y depositados a cierta distancia de la roca madre, como la arenisca o el conglomerado.

Surfactante. Sustancia que reduce la tensión superficial de los líquidos en los cuales se disuelve. Se emplea como defloculante de arcillas.

Transmisividad. Caudal que se filtra a través del área dada por el espesor total del acuífero y un ancho unitario, bajo un gradiente hidráulico unitario a temperatura de 20° C.

Viscosidad. Propiedad de los fluidos en los cuales el roce entre las moléculas dificulta el movimiento uniforme de la masa.

Zona de aireación. Aquella en la que existe aire en contacto con el agua.

BIBLIOGRAFÍA

- American Society for Testing and Materials Standards. (1983). *Standard Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Soils for Geotechnical Purposes*, D1587.
- Acker, W. L. (1974). *Basic Procedures for Soil Sampling and Core Drilling*. Scranton, Pennsylvania.
- Aller y Bennett. (1991). *Handbook of Suggested Practices for the Design and Installation of Ground-Water Monitoring Wells*. Las Vegas, Nevada: Environmental Monitoring Systems Laboratory. U.S. Environmental Protection Agency.
- American Society for Testing and Materials Standards. (1984). *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils* D1586.
- Anderson, K. E. (1975). *Water Well Handbook*. Missouri Water Well and Pump Contractors Assn Inc.
- American Water Works Association. (1984). *Groundwater - Manual of Water Supply Practices*. Nueva York: American Water Works Association.
- American Water Works Association. (1987). Norma ANSI/AWWA C654-87 *Desinfección de pozos*. Denver, Colorado.
- American Water Works Association. (1990). *Standard for Deep Wells*. Nueva York.
- American Water Works Association. (2006). AWWA A100-06 *Water Wells*. Denver, Colorado.
- Barcelona, M. J. (1985). *Practical Guide for Groundwater Sampling*. Champaign, Illinois: Illinois State Water Survey.
- Barton, N. (1974). A Review of the Shear Strength of Filled Discontinuities. *Norwegian Geotechnical Institute Publication*, 1-38.
- Benitez, A. (1963). *Captación de aguas subterráneas*. Madrid, España: Dossat S.A.
- Bieniawski, Z. T. (1974). Estimating the strength of rock materials. *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, 312-320.
- Bolívar del Valle, J. M. (1969). *Hidrología subterránea (Algunos aspectos)*. México, DF: Cía. Mexicana de Aerofoto.

- Cambefort, H. (1962). *Perforaciones y sondeos*. Barcelona, España: Omega S.A.
- Carreira Jiménez, F. (1990). *Perforación a percusión*.
- Castany, G. (1971). *Tratado práctico de las aguas subterráneas*. Barcelona, España: Omega S.A.
- Custodio, E. (1979). *Corrosión e incrustación de pozos*.
- Custodio, E., y Llamas, M. R. (1976). *Hidrología subterránea*. Barcelona, España: Omega S.A.
- Davis, S. N., y De Wiest, R. J. (1971). *Hidrogeología*. Barcelona, España: Ariel S.A.
- Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York. (1980). *Manual de tratamiento de aguas*. México, DF: Limusa.
- Driscoll, F. G. (1986). *Groundwater and Wells*. Saint Paul, Minnesota: Johnson Division.
- Environmental Protection Agency. Office of Water Supply. (1976). *Manual of Water Well Construction Practices*. E.U.A.: E.P.A.
- Everet, L. G. (1980). *Groundwater Monitoring*. Nueva York: General Electric Company, Technology Marketing Operation.
- Fairbanks, M. (1969). *Hydraulic Handbook*. Kansas City: Fairbanks Morse Colt Industries.
- Gibson y Singer. (1989). *Manual de los pozos pequeños*. México, DF: Limusa.
- Helweg, Scott y Scalmanini. (1982). *Improving well and Pump Efficiency*. Denver: American Water Works Association.
- Hem, J. D. (1970). *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. Washington, D.C.: Geological Survey.
- Horta, S. F. (1991). *Desarrollo de pozos*.
- Horta, S. F. (1993). *Rejillas y empaques de grava*.
- Hvorslev, M. J. (1979). *Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purposes*. Vicksburg, Mississippi: USACE.
- Inc, A. D. (1985). *Soil Sampling Tools Catalog*. Scranton, Pennsylvania.
- Ingersoll and Rand Company. (1976). *The Water Well Drilling Equipment Selection Guide*. New Jersey: Ingersoll and Rand Company.
- Johnson Division UOP Inc. (1975). *El agua subterránea y los pozos*. Saint Paul, Minnesota: UOP Inc.
- Keller, G. V. y Frischknecht, F. C. (1966). *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. Pergamon Press.
- Keys, W. S. (1963). *Pressure Cementing of Water Wells on the National Reactor Testing Station*. US Atomic Energy Commission.
- Keys, W. S. y Mc Cary, L. M. (1971). *Techniques of Water Resources Investigations*. Book 2. USGS.

- Koehring Speedstar Division. (s.f.). *Well Drilling Manual*.
- Layne Western Company Inc. (1983). *Water, Geological and Mineral Exploration Utilizing Dual Wall Reverse Circulation*. Product Literature.
- Meyer, R. (1974). *Interpretation Methods for Shallow Seismic Refraction Prospecting and their Applications*. Tesis.
- Mobile Drilling Company. (1982). *Auger Tools and Accesories*. Catalog 182. Indianapolis.
- Moog, J. L. (1975). *Diseño de pozos para agua*. México, DF: UNAM, División de estudios de posgrado.
- National Association of Corrosion Engineers. (1980). *NACE Basic Corrosion Course*. Texas: NACE.
- National Water Well Association of Australia. (1984). *Drillers Tranning and Reference Manual*. National Water Well Association of Australia.
- Orellana, E. (1982). *Prospección geoelectrica en corriente continua*. Paraninfo.
- Pérez Angon, R. (1986). *Comunicación personal*.
- Petroleum Extension Service. (1980). *Principles of Drilling Fluid Control*. Austin, Texas: University of Texas.
- Rider, M. H. (1996). *The Geological Interpretation of Well Logs*. Whittles Publishing.
- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. (s.f.). *Tubos de concreto presforzados. Evaluación de parámetros agresivos*.
- Siemens. (1993). *Catálogo general de motores eléctricos*. Equipo eléctrico industrial.
- Speedstar Division of Koehring Company. (1983). *Well Drilling Manual*. Dublín, Ohio: National Well Association.
- Telford, W. M. (1976). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- Tood, D. K. (1968). *Hydrology*. John Wiley and Sons.
- United States Environmental Protection Agency. (1975). *Manual of Water Well Construction Practices*. Office of Water Supply.
- Zapico, M. M., S. Vales y J. A. Cherry (1987). A wireline piston core barrel for sampling cohesionless sand and gravel below the water table. *Groundwater Monitoring Review* v. 7.



TABLA DE CONVERSIONES DE UNIDADES DE MEDIDA

| Sigla | Significado | Sigla | Significado |
|----------------|---------------------|--------------------|---|
| mg | miligramo | kg/m ³ | kilogramo por metro cúbico |
| g | gramo | l/s | litros por segundo |
| kg | kilogramo | m ³ /d | metros cúbicos por día |
| mm | milímetro | Sm ³ /h | condiciones estándar de metro cúbico por hora |
| cm | centímetro | Scfm | condiciones estándar de pies cúbicos por minuto |
| m | metro | °C | grados Celsius |
| ml | mililitro | psia | libra-fuerza por pulgada cuadrada absoluta |
| l | litro | cm/s | centímetro por segundo |
| m ³ | metro cúbico | m/s | metro por segundo |
| s | segundo | HP | caballo de fuerza (medida de energía) |
| h | hora | kW | kilowatt |
| d | día | UNT | unidades nefelométricas de turbiedad |
| mg/l | miligramo por litro | | |

Longitud

| Sistema métrico | Sistema Inglés | Siglas |
|--|------------------------|--------|
| 1 milímetro (mm) | 0.03 | in |
| 1 centímetro (cm) = 10 mm | 0.39 | in |
| 1 metro (m) = 100 cm | 1.09 | yd |
| 1 kilómetro (km) = 1 000 m | 0.62 | mi |
| Sistema Inglés | Sistema métrico | |
| 1 pulgada (in) | 2.54 | cm |
| 1 pie (ft) = 12 pulgadas | 0.30 | m |
| 1 yarda (yd) = 3 pies | 0.91 | m |
| 1 milla (mi) = 1 760 yardas | 1.60 | km |
| 1 milla náutica (nmi) = 2 025.4 yardas | 1.85 | km |

Superficie

| Sistema métrico | Sistema inglés | Siglas |
|---|-----------------|-----------------|
| 1 cm ² = 100 mm ² | 0.15 | in ² |
| 1 m ² = 10 000 cm ² | 1.19 | yd ² |
| 1 hectárea (ha) = 10 000 m ² | 2.47 | acres |
| 1 km ² = 100 ha | 0.38 | mi ² |
| Sistema Inglés | Sistema métrico | |
| 1 in ² | 6.45 | cm ² |
| 1 ft ² = 144 in ² | 0.09 | m ² |
| 1 yd ² = 9 ft ² | 0.83 | m ² |
| 1 acre = 4 840 yd ² | 4 046.90 | m ² |
| 1 milla ² = 640 acres | 2.59 | km ² |

Volumen/capacidad

| Sistema métrico | Sistema inglés | Siglas |
|---|-----------------|-----------------|
| 1 cm ³ | 0.06 | in ³ |
| 1 dm ³ = 1 000 cm ³ | 0.03 | ft ³ |
| 1 m ³ = 1 000 dm ³ | 1.30 | yd ³ |
| 1 litro (L) = 1 dm ³ | 1.76 | pintas |
| 1 hectolitro (hL) = 100 L | 21.99 | galones |
| Sistema Inglés | Sistema métrico | |
| 1 in ³ | 16.38 | cm ³ |
| 1 ft ³ = 1 728 in ³ | 0.02 | m ³ |
| 1 onza fluida EUA = 1.0408 onzas fluidas RU | 29.57 | mL |
| 1 pinta (16 onzas fluidas) = 0.8327 pintas RU | 0.47 | L |
| 1 galón EUA = 0.8327 galones RU | 3.78 | L |

Masa/peso

| Sistema métrico | Sistema inglés | |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|
| 1 miligramo (mg) | 0.0154 | grano |
| 1 gramo (g) = 1 000 mg | 0.0353 | onza |
| 1 kilogramo (kg) = 1 000 g | 2.2046 | libras |
| 1 tonelada (t) = 1000 kg | 0.9842 | toneladas larga |
| Sistema Inglés | Sistema métrico | |
| 1 onza (oz) = 437.5 granos | 28.35 | g |
| 1 libra (lb) = 16 oz | 0.4536 | kg |
| 1 stone = 14 lb | 6.3503 | kg |
| 1 hundredweight (cwt) = 112 lb | 50.802 | kg |
| 1 tonelada larga = 20 cwt | 1.016 | t |

Temperatura

$$^{\circ}C = \frac{5}{9}(^{\circ}F -$$

$$^{\circ}F = \frac{9}{5}(^{\circ}C) + 32$$

| Otros sistemas de unidades | | Multiplicado por | Sistema Internacional de Unidades (SI) | |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------|--|------------------------|
| Unidad | Símbolo | Factor de conversión | Se convierte a | |
| Longitud | | | | |
| Pie | pie, ft.,' | 0.30 | metro | m |
| Pulgada | plg, in," | 25.40 | milímetro | mm |
| Presión/esfuerzo | | | | |
| Kilogramo fuerza/cm ² | kg _f /cm ² | 98 066.50 | pascal | Pa |
| Libra/pulgada ² | lb/ plg ² , PSI | 6 894.76 | pascal | Pa |
| atmósfera técnica | at | 98 066.50 | pascal | Pa |
| metro de agua | m H ₂ O (mca) | 9 806.65 | pascal | Pa |
| mm de mercurio | mm Hg | 133.32 | pascal | Pa |
| bar | bar | 100 000.00 | pascal | Pa |
| Fuerza/ peso | | | | |
| kilogramo fuerza | kg _f | 9.80 | newton | N |
| Masa | | | | |
| libra | lb | 0.45 | kilogramo | kg |
| onza | oz | 28.30 | gramo | g |
| Peso volumétrico | | | | |
| kilogramo fuerza/m ³ | kg _f /m ³ | 9.80 | N/m ³ | N/m ³ |
| libra /ft ³ | lb/ft ³ | 157.08 | N/m ³ | N/m ³ |
| Potencia | | | | |
| caballo de potencia | CP, HP | 745.69 | watt | W |
| caballo de vapor | CV | 735.00 | watt | W |
| Viscosidad dinámica | | | | |
| poise | μ | 0.01 | pascal segundo | Pa s |
| Viscosidad cinemática | | | | |
| viscosidad cinemática | v | 1 | stoke | m ² /s (St) |
| Energía/ Cantidad de calor | | | | |
| caloría | cal | 4.18 | joule | J |
| unidad térmica británica | BTU | 1 055.06 | joule | J |
| Temperatura | | | | |
| grado Celsius | °C | tk=tc + 273.15 | grado Kelvin | K |

Nota: El valor de la aceleración de la gravedad aceptado internacionalmente es de 9.80665 m/s²

| Longitud | | | | | | | | |
|----------|-----------|---------|-----------|-------|-------|---------------------|-----------|--------|
| de / a | mm | cm | m | km | mi | milla náutica (nmi) | ft | in |
| mm | 1.000 | 0.100 | 0.001 | | | | | |
| cm | 10000 | 1.000 | 0.010 | | | | 0.033 | 0.394 |
| m | 1 000.000 | 100.000 | 1.000 | 0.001 | | | 3.281 | 39.370 |
| km | | | 0.001 | 1.000 | 0.621 | 0.540 | 3 280.83 | 0.039 |
| mi | | | 1 609.347 | 1.609 | 1.000 | 0.869 | 5 280.000 | |
| nmi | | | 1 852.000 | 1.852 | 1.151 | 1.000 | 6 076.115 | |
| ft | | 30.480 | 0.305 | | | | 1.000 | 12.000 |
| in | 25.400 | 2.540 | 0.025 | | | | 0.083 | 1.000 |

| Superficie | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|-----------------|
| de / a | cm ² | m ² | km ² | ha | mi ² | acre | ft ² | in ² |
| cm ² | 1.00 | | | | | | 0.001 | 0.155 |
| m ² | 10 000.00 | 1.00 | | | | | 10.764 | 1 550.003 |
| km ² | | | 1.000 | 100.000 | 0.386 | 247.097 | | |
| ha | | 10 000.00 | 0.010 | 1.000 | 0.004 | 2.471 | | |
| mi ² | | | 2.590 | 259.000 | 1.000 | 640.000 | | |
| acre | | 4 047.00 | 0.004 | 0.405 | 0.002 | 1.000 | | |
| ft ² | 929.03 | 0.09 | | | | | 1.000 | 0.007 |
| in ² | 6.45 | | | | | | 144.000 | 1.000 |

| Volumen | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|----------------|-----------|-----------------|----------|---------|-----------------|-----------------|
| de / a | cm ³ | m ³ | L | ft ³ | gal. EUA | acre-ft | in ³ | yd ³ |
| cm ³ | 1.000 | | 0.001 | | | | 0.061 | |
| m ³ | | 1.000 | 1 000.000 | 35.314 | 264.200 | | | 1.307 |
| L | 1 000.000 | 0.001 | 1.000 | 0.035 | 0.264 | | 61.023 | |
| ft ³ | | 0.028 | 28.317 | 1.000 | 7.481 | | | 0.037 |
| gal. EUA | | 0.004 | 3.785 | 0.134 | 1.000 | | 230.974 | |
| acre-ft | | 1 233.490 | | | | 1.000 | | |
| in ³ | 16.387 | | 0.016 | | 0.004 | | 1.000 | |
| Yd ³ | | 0.765 | | 27.000 | | | | 1.000 |

| Gasto | | | | | | | | |
|---------------------|--------|--------------------|-----------|---------|-----------|---------------------|-------------------|--------------------|
| de / a | l/s | cm ³ /s | gal/día | gal/min | l/min | m ³ /día | m ³ /h | ft ³ /s |
| l/s | 1.000 | 1 000.000 | | 15.851 | 60.000 | 86.400 | 3.600 | 0.035 |
| cm ³ /s | 0.001 | 1.000 | 22.825 | 0.016 | 0.060 | 0.083 | | |
| gal/día | | 0.044 | 1.000 | | | 0.004 | | |
| gal/min | 0.063 | 63.089 | 1 440.000 | 1.000 | 0.000 | 5.451 | 0.227 | 0.002 |
| l/min | 0.017 | 16.667 | 0.000 | 0.264 | 1.000 | 1.440 | 0.060 | |
| m ³ /día | 0.012 | 11.570 | 264.550 | 0.183 | 0.694 | 1.000 | 0.042 | |
| m ³ /h | 0.278 | | 6 340.152 | 4.403 | 16.667 | 24.000 | 1.000 | 0.010 |
| ft ³ /s | 28.316 | | | 448.831 | 1 698.960 | 2 446.590 | 101.941 | 1.000 |

| Eficiencia de pozo | | | |
|--------------------|---|-------------|-------|
| de | a | gal/min/pie | l/s/m |
| gal/min/pie | | 1.000 | 0.206 |
| l/s/m | | 4.840 | 1.000 |

| Permeabilidad | | | | | | | |
|--------------------------|---|--------|--------------------------|-----------------------|-----------|-------|-------|
| de | a | cm/s | gal/día/Pie ² | millones gal/día/acre | m/día | pie/s | Darcy |
| cm/s | | 1.000 | 21 204.78 | | 864.000 | 0.033 | |
| gal/día/pie ² | | | 1.000 | | 0.041 | | 0.055 |
| millón gal/día/acre | | | | 1.000 | 0.935 | | |
| m/día | | 0.001 | 24.543 | 1.069 | 1.000 | | 1.351 |
| pie/s | | 30.480 | | | 26 334.72 | 1.000 | |
| Darcy | | | 18.200 | | 0.740 | | 1.000 |

| Peso | | | | | | | | | |
|----------------|---|---------|-----------|-----------|-----------|--------|----------------|----------------|------------------|
| de | a | grano | gramo | kilogramo | libra | onza | tonelada corta | tonelada larga | tonelada métrica |
| Grano (gr) | | 1.000 | 0.065 | | | | | | |
| Gramo (g) | | 15.432 | 1.000 | 0.001 | 0.002 | | | | |
| Kilogramo (kg) | | | 1 000.000 | 1.000 | 2.205 | 35.273 | | | 0.001 |
| Libra (lb) | | | 453.592 | 0.454 | 1.000 | 16.000 | | | |
| Onza (oz) | | 437.500 | 28.350 | | | 1.000 | | | |
| t corta | | | | 907.180 | 2 000.000 | | 1.000 | | 0.907 |
| t larga | | | | 1 016.000 | 2 240.000 | | 1.119 | 1.000 | 1.016 |
| t métrica | | | | 1 000.000 | 2 205.000 | | 1.101 | 0.986 | 1.000 |

| Potencia | | | | | | | | | |
|----------|---|-------|-------|-------|-----------|-----------|---------|-------|--------|
| de | a | CV | HP | kW | W | ft lb/s | kg m/s | BTU/s | kcal/s |
| CV | | 1.000 | 0.986 | 0.736 | 735.500 | 542.500 | 75.000 | 0.697 | 0.176 |
| HP | | 1.014 | 1.000 | 0.746 | 745.700 | 550.000 | 76.040 | 0.706 | 0.178 |
| kW | | 1.360 | 1.341 | 1.000 | 1 000.000 | 737.600 | 101.980 | 0.948 | 0.239 |
| W | | | | 0.001 | 1.000 | 0.738 | 0.102 | | |
| ft lb/s | | | | | 1.356 | 1.000 | 0.138 | 0.001 | |
| kg m/s | | 0.013 | 0.013 | 0.009 | 9.806 | 7.233 | 1.000 | 0.009 | 0.002 |
| BTU/s | | 1.434 | 1.415 | 1.055 | 1 055.000 | 778.100 | 107.580 | 1.000 | 0.252 |
| kcal/s | | 5.692 | 5.614 | 4.186 | 4 186.000 | 3 088.000 | 426.900 | 3.968 | 1.000 |

| Presión | | | | | | | | |
|--------------------|---|-----------|--------------------|--------------------|----------|----------|-----------------------|------------------------|
| de | a | atmósfera | Kg/cm ² | lb/in ² | mm de Hg | in de Hg | m de H ₂ O | ft de H ₂ O |
| atmósfera | | 1.000 | 1.033 | 14.696 | 760.000 | 29.921 | 10.330 | 33.899 |
| kg/cm ² | | 0.968 | 1.000 | 14.220 | 735.560 | 28.970 | 10.000 | 32.810 |
| lb/in ² | | 0.068 | 0.070 | 1.000 | 51.816 | 2.036 | 0.710 | 2.307 |
| mm de Hg | | 0.001 | 0.001 | 0.019 | 1.000 | 0.039 | 0.013 | 0.044 |
| in de Hg | | 0.033 | 0.035 | 0.491 | 25.400 | 1.000 | 0.345 | 1.133 |
| m de agua | | 0.096 | 0.100 | 1.422 | 73.560 | 2.896 | 1.000 | 3.281 |
| ft de agua | | 0.029 | 0.030 | 0.433 | 22.430 | 0.883 | 0.304 | 1.000 |

| Energía | | | | | | | | | |
|---------|---|---------|---------|---------|-----------|-----------|---------|-----------|---------|
| de | a | CV hora | HP hora | kW hora | J | ft.lb | kgm | BTU | kcal |
| CV hora | | 1.000 | 0.986 | 0.736 | | | | 2 510.000 | 632.500 |
| HP hora | | 1.014 | 1.000 | 0.746 | | | | 2 545.000 | 641.200 |
| kW hora | | 1.360 | 1.341 | 1.000 | | | | 3 413.000 | 860.000 |
| J | | | | | 1.000 | 0.738 | 0.102 | | |
| ft.lb | | | | | 1.356 | 1.000 | 0.138 | | |
| kgm | | | | | 9.806 | 7.233 | 1.000 | | |
| BTU | | | | | 1 054.900 | 778.100 | 107.580 | 1.000 | 0.252 |
| kcal | | | | | 4 186.000 | 3 087.000 | 426.900 | 426.900 | 1.000 |

| Transmisividad | | | | |
|---------------------|---|--------------------|-------------|---------------------|
| de | a | cm ² /s | gal/día/pie | m ² /día |
| cm ² /s | | 1.000 | 695.694 | 8.640 |
| gal/día/ft | | 0.001 | 1.000 | 0.012 |
| m ² /día | | 0.116 | 80.520 | 1.000 |

| Conversión de pies y pulgadas, a metros | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ft, in/m | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 0 | 0.000 | 0.025 | 0.051 | 0.076 | 0.102 | 0.127 | 0.152 | 0.178 | 0.203 | 0.229 | 0.254 | 0.279 |
| 1 | 0.305 | 0.330 | 0.356 | 0.381 | 0.406 | 0.432 | 0.457 | 0.483 | 0.508 | 0.533 | 0.559 | 0.584 |
| 2 | 0.610 | 0.635 | 0.660 | 0.686 | 0.711 | 0.737 | 0.762 | 0.787 | 0.813 | 0.838 | 0.864 | 0.889 |
| 3 | 0.914 | 0.940 | 0.965 | 0.991 | 1.016 | 1.041 | 1.067 | 1.092 | 1.176 | 1.143 | 1.168 | 1.194 |
| 4 | 1.219 | 1.245 | 1.270 | 1.295 | 1.321 | 1.346 | 1.372 | 1.397 | 1.422 | 1.448 | 1.473 | 1.499 |
| 5 | 1.524 | 1.549 | 1.575 | 1.600 | 1.626 | 1.651 | 1.676 | 1.702 | 1.727 | 1.753 | 1.778 | 1.803 |
| 6 | 1.829 | 1.854 | 1.880 | 1.905 | 1.930 | 1.956 | 1.981 | 2.007 | 2.032 | 2.057 | 2.083 | 2.108 |
| 7 | 2.134 | 2.159 | 2.184 | 2.210 | 2.235 | 2.261 | 2.286 | 2.311 | 2.337 | 2.362 | 2.388 | 2.413 |
| 8 | 2.438 | 2.464 | 2.489 | 2.515 | 2.540 | 2.565 | 2.591 | 2.616 | 2.642 | 2.667 | 2.692 | 2.718 |
| 9 | 2.743 | 2.769 | 2.794 | 2.819 | 2.845 | 2.870 | 2.896 | 2.921 | 2.946 | 2.972 | 2.997 | 3.023 |
| 10 | 3.048 | 3.073 | 3.099 | 3.124 | 3.150 | 3.175 | 3.200 | 3.226 | 3.251 | 3.277 | 3.302 | 3.327 |
| 11 | 3.353 | 3.378 | 3.404 | 3.429 | 3.454 | 3.480 | 3.505 | 3.531 | 3.556 | 3.581 | 3.607 | 3.632 |
| 12 | 3.658 | 3.683 | 3.708 | 3.734 | 3.759 | 3.785 | 3.810 | 3.835 | 3.861 | 3.886 | 3.912 | 3.937 |
| 13 | 3.962 | 3.988 | 4.013 | 4.039 | 4.064 | 4.089 | 4.115 | 4.140 | 4.166 | 4.191 | 4.216 | 4.242 |
| 14 | 4.267 | 4.293 | 4.318 | 4.343 | 4.369 | 4.394 | 4.420 | 4.445 | 4.470 | 4.496 | 4.521 | 4.547 |
| 15 | 4.572 | 4.597 | 4.623 | 4.648 | 4.674 | 4.699 | 4.724 | 4.750 | 4.775 | 4.801 | 4.826 | 4.851 |
| 16 | 4.877 | 4.902 | 4.928 | 4.953 | 4.978 | 5.004 | 5.029 | 5.055 | 5.080 | 5.105 | 5.131 | 5.156 |
| 17 | 5.182 | 5.207 | 5.232 | 5.258 | 5.283 | 5.309 | 5.334 | 5.359 | 5.385 | 5.410 | 5.436 | 5.461 |
| 18 | 5.486 | 5.512 | 5.537 | 5.563 | 5.588 | 5.613 | 5.639 | 5.664 | 5.690 | 5.715 | 5.740 | 5.766 |
| 19 | 5.791 | 5.817 | 5.842 | 5.867 | 5.893 | 5.918 | 5.944 | 5.969 | 5.994 | 6.020 | 6.045 | 6.071 |
| 20 | 6.096 | 6.121 | 6.147 | 6.172 | 6.198 | 6.223 | 6.248 | 6.274 | 6.299 | 6.325 | 6.350 | 6.375 |
| 21 | 6.401 | 6.426 | 6.452 | 6.477 | 6.502 | 6.528 | 6.553 | 6.579 | 6.604 | 6.629 | 6.655 | 6.680 |
| 22 | 6.706 | 6.731 | 6.756 | 6.782 | 6.807 | 6.833 | 6.858 | 6.883 | 6.909 | 6.934 | 6.960 | 6.985 |
| 23 | 7.010 | 7.036 | 7.061 | 7.087 | 7.112 | 7.137 | 7.163 | 7.188 | 7.214 | 7.239 | 7.264 | 7.290 |
| 24 | 7.315 | 7.341 | 7.366 | 7.391 | 7.417 | 7.442 | 7.468 | 7.493 | 7.518 | 7.544 | 7.569 | 7.595 |
| 25 | 7.620 | 7.645 | 7.671 | 7.696 | 7.722 | 7.747 | 7.772 | 7.798 | 7.823 | 7.849 | 7.874 | 7.899 |
| 26 | 7.925 | 7.950 | 7.976 | 8.001 | 8.026 | 8.052 | 8.077 | 8.103 | 8.128 | 8.153 | 8.179 | 8.204 |
| 27 | 8.230 | 8.255 | 8.280 | 8.306 | 8.331 | 8.357 | 8.382 | 8.407 | 8.433 | 8.458 | 8.484 | 8.509 |
| 28 | 8.534 | 8.560 | 8.585 | 8.611 | 8.636 | 8.661 | 8.687 | 8.712 | 8.738 | 8.763 | 8.788 | 8.814 |
| 29 | 8.839 | 8.865 | 8.890 | 8.915 | 8.941 | 8.966 | 8.992 | 9.017 | 9.042 | 9.068 | 9.093 | 9.119 |
| 30 | 9.144 | 9.169 | 9.195 | 9.220 | 9.246 | 9.271 | 9.296 | 9.322 | 9.347 | 9.373 | 9.398 | 9.423 |
| 31 | 9.449 | 9.474 | 9.500 | 9.525 | 9.550 | 9.576 | 9.601 | 9.627 | 9.652 | 9.677 | 9.703 | 9.728 |
| 32 | 9.754 | 9.779 | 9.804 | 9.830 | 9.855 | 9.881 | 9.906 | 9.931 | 9.957 | 9.982 | 10.008 | 10.033 |
| 33 | 10.058 | 10.084 | 10.109 | 10.135 | 10.160 | 10.185 | 10.211 | 10.236 | 10.262 | 10.287 | 10.312 | 10.338 |
| 34 | 10.363 | 10.389 | 10.414 | 10.439 | 10.465 | 10.490 | 10.516 | 10.541 | 10.566 | 10.592 | 10.617 | 10.643 |
| 35 | 10.668 | 10.693 | 10.719 | 10.744 | 10.770 | 10.795 | 10.820 | 10.846 | 10.871 | 10.897 | 10.922 | 10.947 |

La segunda columna es la conversión de pies a metros; las siguientes columnas son la conversión de pulgadas a metros que se suman a la anterior conversión.

| Tabla de conversión de pulgadas a milímetros | | | | | | | | |
|--|-------|---------|--------|---------|-------|---------|--------|---------|
| Pulgadas | 0 | 1/8 | 1/4 | 3/8 | 1/2 | 5/8 | 3/4 | 7/8 |
| 0 | 0 | 3.175 | 6.35 | 9.525 | 12.7 | 15.875 | 19.05 | 22.225 |
| 1 | 25.4 | 28.575 | 31.75 | 34.925 | 38.1 | 41.275 | 44.45 | 47.625 |
| 2 | 50.8 | 53.975 | 57.15 | 60.325 | 63.5 | 66.675 | 69.85 | 73.025 |
| 3 | 76.2 | 79.375 | 82.55 | 85.725 | 88.9 | 92.075 | 95.25 | 98.425 |
| 4 | 101.6 | 104.775 | 107.95 | 111.125 | 114.3 | 117.475 | 120.65 | 123.825 |
| 5 | 127.0 | 130.175 | 133.35 | 136.525 | 139.7 | 142.875 | 146.05 | 149.225 |
| 6 | 152.4 | 155.575 | 158.75 | 161.925 | 165.1 | 168.275 | 171.45 | 174.625 |
| 7 | 177.8 | 180.975 | 184.15 | 187.325 | 190.5 | 193.675 | 196.85 | 200.025 |
| 8 | 203.2 | 206.375 | 209.55 | 212.725 | 215.9 | 219.075 | 222.25 | 225.425 |
| 9 | 228.6 | 231.775 | 234.95 | 238.125 | 241.3 | 244.475 | 247.65 | 250.825 |
| 10 | 254.0 | 257.175 | 260.35 | 263.525 | 266.7 | 269.875 | 273.05 | 276.225 |
| 11 | 279.4 | 282.575 | 285.75 | 288.925 | 292.1 | 295.275 | 298.45 | 301.625 |
| 12 | 304.8 | 307.975 | 311.15 | 314.325 | 317.5 | 320.675 | 323.85 | 327.025 |
| 13 | 330.2 | 333.375 | 336.55 | 339.725 | 342.9 | 346.075 | 349.25 | 352.425 |
| 14 | 355.6 | 358.775 | 361.95 | 365.125 | 368.3 | 371.475 | 374.65 | 377.825 |
| 15 | 381.0 | 384.175 | 387.35 | 390.525 | 393.7 | 396.875 | 400.05 | 403.225 |
| 16 | 406.4 | 409.575 | 412.75 | 415.925 | 419.1 | 422.275 | 425.45 | 428.625 |
| 17 | 431.8 | 434.975 | 438.15 | 441.325 | 444.5 | 447.675 | 450.85 | 454.025 |
| 18 | 457.2 | 460.375 | 463.55 | 466.725 | 469.9 | 473.075 | 476.25 | 479.425 |
| 19 | 482.6 | 485.775 | 488.95 | 492.125 | 495.3 | 498.475 | 501.65 | 504.825 |
| 20 | 508.0 | 511.175 | 514.35 | 517.525 | 520.7 | 523.875 | 527.05 | 530.225 |
| 21 | 533.4 | 536.575 | 539.75 | 542.925 | 546.1 | 549.275 | 552.45 | 555.625 |
| 22 | 558.8 | 561.975 | 565.15 | 568.325 | 571.5 | 574.675 | 577.85 | 581.025 |
| 23 | 584.2 | 587.375 | 590.55 | 593.725 | 596.9 | 600.075 | 603.25 | 606.425 |
| 24 | 609.6 | 612.775 | 615.95 | 619.125 | 622.3 | 625.475 | 628.65 | 631.825 |
| 25 | 635.0 | 638.175 | 641.35 | 644.525 | 647.7 | 650.875 | 654.05 | 657.225 |
| 26 | 660.4 | 663.575 | 666.75 | 669.925 | 673.1 | 676.275 | 679.45 | 682.625 |
| 27 | 685.8 | 688.975 | 692.15 | 695.325 | 698.5 | 701.675 | 704.85 | 708.025 |
| 28 | 711.2 | 714.375 | 717.55 | 720.725 | 723.9 | 727.075 | 730.25 | 733.425 |
| 29 | 736.6 | 739.775 | 742.95 | 746.125 | 749.3 | 752.475 | 755.65 | 758.825 |
| 30 | 762.0 | 765.175 | 768.35 | 771.525 | 774.7 | 777.875 | 781.05 | 784.225 |

Fórmulas generales para la conversión de los diferentes sistemas

| | |
|--------------------------|--|
| Centígrados a Fahrenheit | $^{\circ}\text{F}=9/5^{\circ}\text{C}+32$ |
| Fahrenheit a Centígrados | $^{\circ}\text{C}=5/9 (^{\circ}\text{F}-32)$ |
| Reaumur a Centígrados | $^{\circ}\text{C}=5/4 ^{\circ}\text{R}$ |
| Fahrenheit a Réaumur | $^{\circ}\text{R}=4/9 (^{\circ}\text{F}-32)$ |
| Réaumur a Fahrenheit | $^{\circ}\text{F}=(9/4^{\circ}\text{R})+32$ |
| Celsius a Kelvin | $^{\circ}\text{K}=273.15+^{\circ}\text{C}$ |
| Fahrenheit a Rankine | $^{\circ}\text{Ra}=459.67+^{\circ}\text{F}$ |
| Rankine a Kelvin | $^{\circ}\text{K}=5/9^{\circ}\text{Ra}$ |

| Factores químicos de conversión | | | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| | A | B | C | D | E |
| Constituyentes | e _{pm} a ppm | ppm a e _{pm} | e _{pm} a gpg | gpg a e _{pm} | ppm a ppm CaCO ₃ |
| calcio Ca ⁺² | 20.04 | 0.04991 | 1.1719 | 0.8533 | 2.4970 |
| hierro Fe ⁺² | 27.92 | 0.03582 | 1.6327 | 0.6125 | 1.7923 |
| magnesio Mg ⁺² | 12.16 | 0.08224 | 0.7111 | 1.4063 | 4.1151 |
| potasio K ⁺¹ | 39.10 | 0.02558 | 2.2865 | 0.4373 | 1.2798 |
| sodio Na ⁺¹ | 23.00 | 0.04348 | 1.3450 | 0.7435 | 2.1756 |
| bicarbonato (HCO ₃) ⁻¹ | 61.01 | 0.01639 | 3.5678 | 0.2803 | 0.8202 |
| carbonato (CO ₃) ⁻² | 30.00 | 0.03333 | 1.7544 | 0.5700 | 1.6680 |
| cloro (Cl) ⁻¹ | 35.46 | 0.02820 | 2.0737 | 0.4822 | 1.4112 |
| hidróxido (OH) ⁻¹ | 17.07 | 0.05879 | 0.9947 | 1.0053 | 2.9263 |
| nitrate (NO ₃) ⁻¹ | 62.01 | 0.01613 | 3.6263 | 0.2758 | 0.8070 |
| fosfato (PO ₄) ⁻³ | 31.67 | 0.03158 | 1.8520 | 0.5400 | 1.5800 |
| sulfato (SO ₄) ⁻² | 48.04 | 0.02082 | 2.8094 | 0.3559 | 1.0416 |
| bicarbonato de calcio Ca(HCO ₃) ₂ | 805.00 | 0.01234 | 4.7398 | 0.2120 | 0.6174 |
| carbonato de calcio (CaCO ₃) | 50.04 | 0.01998 | 2.9263 | 0.3417 | 1.0000 |
| cloruro de calcio (CaCl ₂) | 55.50 | 0.01802 | 3.2456 | 0.3081 | 0.9016 |
| hidróxido de calcio Ca(OH) ₂ | 37.05 | 0.02699 | 2.1667 | 0.4615 | 1.3506 |
| sulfato de calcio (CaSO ₄) | 68.07 | 0.01469 | 3.9807 | 0.2512 | 0.7351 |
| bicarbonato férrico Fe(HCO ₃) ₃ | 88.93 | 0.01124 | 5.2006 | 0.1923 | 0.5627 |
| carbonato férrico Fe ₂ (CO ₃) ₃ | 57.92 | 0.01727 | 3.3871 | 0.2951 | 0.8640 |
| sulfato férrico Fe ₂ (CO ₄) ₃ | 75.96 | 0.01316 | 4.4421 | 0.2251 | 0.6588 |
| bicarbonato magnésico Mg(HCO ₃) ₂ | 73.17 | 0.01367 | 4.2789 | 0.2337 | 0.6839 |
| carbonato magnésico (MgCO ₃) | 42.16 | 1.02372 | 2.4655 | 0.4056 | 1.1869 |
| cloruro de magnesio (MgCl ₂) | 47.62 | 0.02100 | 2.7848 | 0.3591 | 1.0508 |
| hidróxido de magnesio Mg(OH) ₂ | 29.17 | 0.03428 | 1.7058 | 0.5862 | 1.7155 |
| sulfato de magnesio (MgSO ₄) | 60.20 | 0.01661 | 3.5202 | 0.2841 | 0.6312 |

e_{pm} = equivalentes por millón

ppm = partes por millón

gpg = granos por galón

p.p.m. CaCO₃ = partes por millón de carbonato de calcio



ILUSTRACIONES

| | |
|--|----|
| Ilustración 1.1 El ciclo hidrológico | 1 |
| Ilustración 1.2 Procesos de precipitación | 2 |
| Ilustración 1.3 Hidrogramas a) Lluvia de baja intensidad, b) Lluvia de alta intensidad | 3 |
| Ilustración 1.4 a) Plantas xerófitas; b) Plantas freatofitas | 4 |
| Ilustración 1.5 Régimen de escurrimiento superficial | 6 |
| Ilustración 1.6 Infiltrómetros | 6 |
| Ilustración 1.7 Porosidad | 8 |
| Ilustración 1.8 Influencia de la granulometría sobre la porosidad | 8 |
| Ilustración 1.9 Tipos de porosidad: Primaria a), b), c); Secundaria d) | 8 |
| Ilustración 1.10 Conductividad hidráulica | 10 |
| Ilustración 1.11 Coeficiente de almacenamiento | 13 |
| Ilustración 1.12 Distribución del agua en el subsuelo | 21 |
| Ilustración 1.13 Tipos de acuíferos | 22 |
| Ilustración 1.14 Acuíferos Kársticos | 24 |
| Ilustración 1.15 Acuífero aluvial | 28 |
| Ilustración 2.1 Mapa geológico | 31 |
| Ilustración 2.2 Plano hidrogeológico | 31 |
| Ilustración 2.3 Plano topográfico | 32 |
| Ilustración 2.4 Fotografía aérea | 33 |
| Ilustración 2.5 Secciones hidrogeológicas | 34 |
| Ilustración 2.6 Formato para levantamiento de pozos | 35 |
| Ilustración 3.1 Diagrama de Collins | 45 |
| Ilustración 3.2 Diagrama de Stiff | 46 |
| Ilustración 3.3 Diagrama circular seccionado | 46 |
| Ilustración 3.4 Diagrama de Piper-Hill-Langer | 47 |
| Ilustración 3.5 Tiempo de permanencia del agua en el subsuelo | 49 |
| Ilustración 3.6 El subsuelo: planta de tratamiento | 51 |
| Ilustración 3.7 Contaminación industrial | 52 |
| Ilustración 3.8 Contaminación urbana | 53 |
| Ilustración 3.9 Contaminación agrícola | 53 |
| Ilustración 3.10 Contaminación en el medio rural | 54 |
| Ilustración 4.1 Pozo punta manual y Pozo punta con polea y malacate | 60 |
| Ilustración 4.2 Perforación por percusión y chorro | 63 |
| Ilustración 4.3 Perforación por percusión con cable y herramienta | 64 |
| Ilustración 4.4 Barrenos manuales | 68 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 4.5 Barrena espiral | 68 |
| Ilustración 4.6 Barrena taladro sólida | 70 |
| Ilustración 4.7 Barrena taladro hueca | 72 |
| Ilustración 4.8 Barrena cedazo | 74 |
| Ilustración 4.9 Martillos de fondo | 76 |
| Ilustración 4.10 Comparación entre Martillo y Barrena tricónica | 77 |
| Ilustración 4.11 Perforación rotaria con ademe a percusión | 78 |
| Ilustración 4.12 Perforación rotaria con circulación directa | 80 |
| Ilustración 4.13 Circulación inversa de fluidos | 80 |
| Ilustración 4.14 Tipos de barrenas tricónicas | 81 |
| Ilustración 4.15 Tipos de barrenas ciegas | 82 |
| Ilustración 4.16 Tipos de barrenas ciegas | 82 |
| Ilustración 4.17 Perforación rotaria con doble tubería y circulación inversa | 85 |
| Ilustración 4.18 Densidad de los fluidos de perforación | 89 |
| Ilustración 4.19 Comportamiento de la bentonita en el agua | 91 |
| Ilustración 5.1 Corte litológico | 101 |
| Ilustración 5.2 Juego de tamices | 102 |
| Ilustración 5.3 Curva típica de análisis por tamiz | 103 |
| Ilustración 5.4 a) Arena fina, uniforme, que suministra agua a velocidades limitadas, b) Mezcla de arena mediana y gruesa con buena permeabilidad | 105 |
| Ilustración 5.5 Condiciones en el pozo | 105 |
| Ilustración 5.6 Representación del potencial espontáneo estático | 107 |
| Ilustración 5.7 Dispositivo real arreglo normal | 108 |
| Ilustración 5.8 Dispositivo real arreglo lateral | 109 |
| Ilustración 5.9 Arreglo de la sonda de inducción | 110 |
| Ilustración 5.10 Sistema de registro de guarda | 110 |
| Ilustración 5.11 Respuestas típicas de rayos gamma naturales | 111 |
| Ilustración 5.12 Principio de sonda gama-gama | 112 |
| Ilustración 5.13 Sistema de densidad compensada | 113 |
| Ilustración 5.14 Sistema Neutrón Térmico | 113 |
| Ilustración 5.15 Sonda de temperatura | 114 |
| Ilustración 5.16 Sonda de calibración | 115 |
| Ilustración 5.17 Clasificación de “calidad de roca” por interpretación geofísica | 121 |
| Ilustración 6.1 Espesores y diámetros del ademe | 127 |
| Ilustración 6.2 Esfuerzos ejercidos sobre el tubo de ademe | 129 |
| Ilustración 6.3 Sistemas de unión en ademes de PVC | 132 |
| Ilustración 6.4 Herramientas y accesorios | 133 |
| Ilustración 6.5 Tipos de uniones usadas para el ensamble entre ademes | 134 |
| Ilustración 6.6 Elección de la apertura del cedazo con base a la granulometría del filtro | 138 |

| | |
|---|-----|
| Ilustración 6.7 Tipos de ademes ranurados | 139 |
| Ilustración 6.8 Diseño del filtro de grava para un acuífero de arenisca semiconsolidada | 140 |
| Ilustración 6.9 Curvas granulométricas: filtro y muestras del acuífero | 141 |
| Ilustración 7.1 Tubos engravadores | 146 |
| Ilustración 7.2 Método de limpieza | 148 |
| Ilustración 7.3 Pistón de limpieza | 148 |
| Ilustración 7.4 Desarrollo por pistoneo | 149 |
| Ilustración 7.5 Desarrollo por sifoneo | 150 |
| Ilustración 7.6 Desarrollo por chifloneo | 151 |
| Ilustración 7.7 Comportamiento del flujo por chifloneo en diferentes tipos de cedazos | 151 |
| Ilustración 8.1 Acuífero libre | 157 |
| Ilustración 8.2 Acuífero confinado | 159 |
| Ilustración 8.3 Gráfica de una prueba de aforo a caudal escalonado discontinuo | 162 |
| Ilustración 8.4 Gráfica de una prueba de aforo a caudal escalonado continuo | 163 |
| Ilustración 8.5 Ubicación del caudal útil y punto crítico | 164 |
| Ilustración 8.6 Curvas características de acuíferos libre y confinado | 168 |
| Ilustración 8.7 Curvas características: a) acuífero confinado, b) libre, c) con pérdidas y d) datos mal tomados | 169 |
| Ilustración 8.8 Anomalía en la curva característica | 169 |
| Ilustración 8.9 Gráfica de prueba de aforo | 171 |
| Ilustración 9.1 Bomba de émbolo o de pistón | 174 |
| Ilustración 9.2 Bomba de turbina vertical lubricada con agua | 176 |
| Ilustración 9.3 Bomba de turbina vertical lubricada con aceite | 177 |
| Ilustración 9.4 Dimensiones generales de los motores verticales | 179 |
| Ilustración 9.5 Partes que integran una bomba sumergible | 179 |
| Ilustración 9.6 Bomba de chorro | 180 |
| Ilustración 9.7 Piezómetro tipo orificio calibrado | 192 |
| Ilustración 9.8 Medidor tipo hélice | 192 |
| Ilustración 9.9 Especificaciones de los medidores tipo turbina | 193 |
| Ilustración 9.10 Medidor electrónico | 194 |
| Ilustración 9.11 Especificaciones de la sonda eléctrica | 195 |
| Ilustración 9.12 Funcionamiento de la sonda neumática | 195 |
| Ilustración 9.13 Acoplamiento de la sonda acústica: a) en pozos de monitoreo, b) en pozos de producción | 196 |
| Ilustración 11.1 Esquema típico de una galería filtrante | 211 |
| Ilustración 11.2 Elementos de una Zanja | 212 |
| Ilustración 11.3 Parte superficial de un pozo radial | 213 |
| Ilustración 11.4 Elementos hidráulicos de un pozo radial | 213 |
| Ilustración 11.5 Ubicación vertical de colectores para prevenir captación de agua contaminada a) El colector somero capta agua contaminada b) El colector profundo extrae agua de mejor calidad | 214 |

| | |
|---|-----|
| Ilustración 11.6 Captación indirecta de corrientes superficiales | 215 |
| Ilustración 11.7 Perforaciones para la colocación de los colectores | 217 |
| Ilustración 11.8 Dispositivos de hincado para la instalación de los tubos de cedazo | 218 |
| Ilustración 11.9 Zapata frontal y cedazo | 218 |
| Ilustración 11.10 Colector individual con tapa provisional | 219 |
| Ilustración 11.11 Pozos “Punta” | 220 |

TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1.1 Intervalos de porosidad de materiales | 9 |
| Tabla 1.2 Valores medios de K y k | 11 |
| Tabla 1.3 Resistividades de materiales y elementos (Telford, 1976) | 14 |
| Tabla 1.4 Resistividades de minerales (Telford, 1976) | 15 |
| Tabla 1.5 Resistividades de mineralizaciones (Telford, 1976) | 16 |
| Tabla 1.6 Resistividades de mineralizaciones (Telford, 1976)(continuación) | 17 |
| Tabla 1.7 Resistividades de rocas ígneas y metamórficas (Telford, 1976) | 18 |
| Tabla 1.8 Resistividades de rocas ígneas y metamórficas (Telford, 1976)(continuación) | 18 |
| Tabla 1.9 Resistividades de rocas sedimentarias (Telford, 1976) | 19 |
| Tabla 1.10 Resistividad del agua (Orellana, 1972) | 19 |
| Tabla 1.11 Variación de la porosidad de la roca con la edad (Keller y Frischknecht, 1966) | 20 |
| Tabla 2.1 Fuentes de información | 30 |
| Tabla 2.2 Orden de magnitud de la resistividad para algunos tipos de agua y para rocas comunes | 37 |
| Tabla 3.1 Fuentes naturales de los principales componentes disueltos del agua subterránea | 49 |
| Tabla 3.2 Efectos sobre la salud de algunos compuestos químicos de uso doméstico común | 57 |
| Tabla 4.1 Viscosidades por Embudo de Marsh para perforar materiales no consolidados | 90 |
| Tabla 4.2 Concentraciones normales, viscosidades y velocidades de ascenso de los principales tipos de fluidos de perforación | 93 |
| Tabla 4.3 Comparativa de aditivos de perforación por marcas | 94 |
| Tabla 4.4 Funcionamiento relativo de los métodos de perforación de diferentes tipos de formaciones geológicas | 96 |
| Tabla 5.1 Clasificación de suelos y rocas para formular estimaciones de trabajos de perforación | 102 |
| Tabla 5.2 Calidad de roca | 119 |
| Tabla 5.3 Calidad de roca (continuación) | 120 |
| Tabla 5.4 Descripción de clasificación de rocas por interpretación geofísica | 120 |
| Tabla 6.1 Diámetro del ademe en función al gasto esperado | 126 |
| Tabla 6.2 Descarga máxima a partir del diámetro estándar del ademe | 126 |
| Tabla 6.3 Empresas que manufacturan ademes en fluoropolímeros | 129 |
| Tabla 6.4 Se resumen las propiedades físicas de estos materiales | 131 |
| Tabla 6.5 Propiedades físicas de ademes para pozos | 133 |
| Tabla 6.6 Correlación entre la apertura del cedazo y el tamaño de las partículas evaluado por tamices | 136 |
| Tabla 6.7 Características y ventajas de los filtros | 143 |
| Tabla 6.8 Volumen requerido del filtro | 143 |
| Tabla 6.9 Elección de estabilizadores para acuíferos no-consolidados y semi-consolidados | 143 |
| Tabla 8.1 Tiempos de lectura para pruebas de aforo | 165 |
| Tabla 9.1 Motores eléctricos verticales de flecha hueca | 178 |
| Tabla 9.2 Dimensiones generales de los motores verticales (mm) | 178 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 9.3 Guía para la selección de bombas | 181 |
| Tabla 9.4 Guía para la elevación de la potencia de la bomba en relación al gasto requerido y diferentes alturas | 183 |
| Tabla 9.5 Características eléctricas de apartarayos | 184 |
| Tabla 9.6 Datos técnicos del corta circuitos fusible, intemperie, tipo expulsión | 185 |
| Tabla 9.7 Capacidad en amperes (A) de fusibles para transformadores | 185 |
| Tabla 9.8 Transformadores de alta tensión (15.25 y 34.5 KV) | 186 |
| Tabla 9.9 Características de interruptores termomagnéticos | 187 |
| Tabla 9.10 Motores verticales en 440 V | 188 |
| Tabla 9.11 Motores verticales en 220 V | 190 |
| Tabla 10.1 Compuestos desincrustantes | 204 |

