

# MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

## REHABILITACIÓN DE POZOS

40



# MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

## REHABILITACIÓN DE POZOS

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento  
Rehabilitación de Pozos

ISBN: 978-607-626-028-9

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	VII
Objetivo general	IX
Introducción a la Rehabilitación de pozos	XI
1. Eficiencia de Pozos	1
1.1. Pérdidas de Eficiencia Debidas a las Características del Acuífero	2
1.2. Pérdidas de Eficiencia Debidas a las Características del Pozo	4
1.2.1. Método de Rorabaugh	4
1.3. Medición de la eficiencia	6
1.4. Mediciones preliminares	8
1.4.1. Equipo necesario	8
1.4.2. Medición de los niveles de bombeo y presión de descarga	9
1.4.3. Medición de gasto y frecuencia de rotación	9
1.4.4. Interpretación de la prueba	11
1.4.5. Secuencia de operaciones	12
2. Diagnóstico de Pozos Ineficientes; sus Causas y Posibles Soluciones	15
2.1. Defectos de Diseño	15
2.1.1. Pozos incompletos	16
2.1.2. Cedazo en exceso	17
2.1.3. Falta de cedazo	18
2.1.4. Información litológica inadecuada	18
2.1.5. Filtro granular o cedazo mal diseñado	18
2.1.6. Aforo mal realizado o interpretado	19
2.1.7. Mala protección sanitaria y química del pozo	19
2.2. Defectos Constructivos	20
2.2.1. Fluidos de perforación inadecuados	20
2.2.2. Falta de desarrollo del pozo	21
2.2.3. Filtro granular mal colocado	22
2.2.4. Fallas en la colocación del ademe	22
2.2.5. Falta de verticalidad del pozo	23
2.2.6. Materiales defectuosos o inadecuados	24
2.3. Defectos Operacionales	24
2.3.1. Falta de mantenimiento del pozo	24
2.3.2. Falta de mantenimiento en la bomba	25
2.3.3. Falta de reposición de filtro granular	25
2.3.4. Arranques y paros frecuentes del equipo	25
2.4. Causas Regionales	26
2.4.1. Aguas corrosivas	26
2.4.2. Aguas incrustantes	26

2.4.3. Bacterias ferruginosas	27
2.4.4. Abatimientos regionales de los niveles freáticos	27
3. Operaciones y Métodos de Rehabilitación de Pozos	29
3.1. Ademes Rotos, Colapsados o Mal Soldados	30
3.1.1. Reparación de ademes colapsados	30
3.1.2. Reparación de ademes rotos	31
3.2. Cementaciones	32
3.2.1. Tapones de fondo	32
3.2.2. Cementaciones intermedias	32
3.2.3. Composición de la lechada	33
3.3. Lavado y Cepillado de Ademes	33
3.4. Pistones de Caucho	34
3.5. Remoción de Sólidos con Aire Comprimido	34
3.6. Sonar Jet	34
3.7. Colocación de Falsos Ademes	35
3.7.1. Falsos ademes en pozos con ademes rotos	35
3.7.2. Falsos ademes en pozos productores de arena	36
3.8. Colocación de Camisas	37
3.9. Determinación de la Geometría del Pozo	37
3.9.1. Bloques impresores	37
3.9.2. Calibración del pozo	37
3.9.3. Registro de Video	38
3.9.4. Registros de verticalidad	38
3.10. Inspección de la bomba del pozo	43
3.11. Reparación de la bomba del pozo	44
3.12. Pescas	44
3.12.1. Bloque de impresión	44
3.13. Prensa Electrohidráulica	46
3.14. Profundización de Pozos	47
3.15. Reposición del Filtro Granular	49
3.16. Verificación de la Rehabilitación	50
4. Incrustación y corrosión de pozos	53
4.1. Incrustación	53
4.1.1. Tipos de incrustación de origen natural	54
4.1.2. Características y funcionamiento de los pozos que favorecen la incrustación	56
4.1.3. Prevención de la incrustación y desincrustación	56
4.2. Corrosión	57
4.2.1. Procesos electrolíticos	58
4.2.2. Corrosión uniforme	58
4.2.3. Corrosión localizada	58
4.2.4. Prevención de la corrosión	60

5. Desarrollo de Pozos	63
5.1. Objetivos del Desarrollo	63
5.2. Métodos de Desarrollo Químico	63
5.2.1. Tratamiento con polifosfatos	63
5.2.2. Nieve carbónica	64
5.2.3. Acidificación	66
5.2.4. Cloración	68
5.3. Métodos de Desarrollo Físico	69
5.3.1. Desarrollos con bomba de pozo profundo	70
5.3.2. Desarrollos con bomba de inyección	72
5.3.3. Desarrollos con oleada mecánica o pistoneo	73
5.3.4. Desarrollo neumático	76
5.3.5. Desarrollo de formaciones rocosas	80
6. Aforo de Pozos	83
6.1. Equipo de Bombeo	83
6.2. Programa de aforo	83
6.3. Interpretación de aforo	84
6.3.1. El caudal óptimo de explotación	86
6.4. Cálculo de la transmisividad del acuífero a partir de la recuperación del pozo	92
7. Herramientas de pesca	95
7.1. Tipos de herramientas	95
7.1.1. Porta cable rígido	95
7.1.2. Barretón de pesca	96
7.1.3. Tijeras de pesca	96
7.1.4. Corta cable	96
7.1.5. Golpeador	96
7.1.6. Campana de fricción	97
7.1.7. Campana con mordazas	98
7.1.8. Campana de círculo completo	98
7.1.9. Costilla	98
7.1.10. Gancho centrador (Mano de diablo)	98
7.1.11. Pescante de cucharas	99
7.1.12. Pescacable	99
7.1.13. Arpón pescacable con pestillo	99
7.1.14. Cucharas	100
8. Materiales de Construcción del Pozo	101
8.1. El Filtro Granular	101
8.1.1. Gráfica granulométrica	102
8.1.2. Métodos de diseño del filtro granular	103
8.1.3. Espesor del filtro granular	104
8.1.4. Origen del filtro granular	104

8.1.5. Selección del tamaño de la abertura del cedazo	104
8.2. Ademes de Pozos	104
8.2.1. Materiales constructivos	106
8.2.2. Unión de tubos del ademe	107
8.2.3. Ademes metálicos	107
8.2.4. Ademes de PVC	109
8.2.5. Aberturas de las ranuras del tubo	109
9. La Supervisión en la Rehabilitación de Pozos	111
9.1. Recopilación Preliminar de Información	111
9.2. Desinstalación del equipo de bombeo	112
9.3. Trabajos de rehabilitación	113
9.3.1. La supervisión de campo	113
9.3.2. El reporte de trabajo	113
9.3.3. Informe final de los trabajos	113
Conclusiones del libro	115
Glosario	117
Bibliografía	121
Anexos	
A.1. Cementaciones	125
A.2. Corrosión e Incrustación	129
A.3. Diseño de Filtro Granular	132
A.4. Eficiencia de pozos	139
Tabla de conversiones de unidades de medida	145
Ilustraciones	155
Tablas	157

# 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 A LA REHABILITACIÓN DE POZOS

La explotación de aguas subterráneas durante las últimas tres décadas se ha incrementado a través de la construcción de pozos que se suponen eficientes, pero que no lo son, ya que en su proceso de construcción o en la rehabilitación no se aplica toda la tecnología disponible hoy en día y que se tiene en el mercado. Comúnmente se define a la eficiencia, como la relación entre la energía proporcionada al sistema y la que se recupera del mismo, expresado generalmente como un porcentaje. En el primer capítulo del libro se aborda el tema de pérdidas de eficiencia debidas a las características del acuífero, pérdidas debidas a las características del pozo, medición de la eficiencia, mediciones preliminares.

En el capítulo 2 se presenta el tema de diagnóstico de pozos ineficientes; sus causas y posibles soluciones. Sin considerar la errónea localización del pozo, y asumiendo que ésta es adecuada; existen numerosas razones para que un pozo funcione en forma ineficiente, entre las que destacan; defecto de diseño, defectos de construcción, defectos de operación, causas regionales. Sin considerar ni su importancia relativa, ni la frecuencia con que se presentan, pues estas condiciones varían notablemente de una región a otra y de un pozo a otro en una misma zona.

Las operaciones y métodos de rehabilitación de pozos son tan variados como las condiciones geohidrológicas, de proyecto, constructivas y de operación de la obra, por lo que en el capítulo 3 se mencionan algunas como son: ademes rotos colapsados o mal soldados, cementaciones, lavado y cepillado de ademes, remoción de sólidos con aire comprimido, pistoneo de caucho, colocación de falsos ademes, colocación de camisas, geometría del pozo, pesca.

Por tanto, pretender establecer especificaciones precisas de las actividades de rehabilitación resulta prácticamente imposible, pues en cada caso en particular se deberán programar las acciones a realizar de análisis del proyecto.

La mayor parte de la pérdida de rendimiento dentro de un pozo bien construido, viene dado por dos efectos: la corrosión y la incrustación.

La composición del agua en general es de naturaleza corrosiva o incrustante. En el capítulo 4 se presentan los tipos de corrosión e incrustación y su prevención.

El desarrollo de pozos es una de las actividades primordiales en la construcción, que generalmente se repite varias veces a lo largo de su vida útil, como parte de los trabajos de mantenimiento y rehabilitación en el capítulo 5 se menciona el objetivo del desarrollo y los métodos que existen.

Por su parte el aforo de pozos tiene por objetivo establecer el caudal óptimo que se debe de explotar, mediante las pruebas de bombeo, la programación del aforo, la interpretación y los cálculos de transmisividad del acuífero partir de la recuperación del pozo. Todo esto se presenta en el capítulo 6.

En el capítulo 7 se presentan herramientas que se pueden utilizar para los procesos de pesca, una vez aprobados por el proyectista y el organismo involucrado.

Lo que respecta a materiales de construcción del pozo, en el capítulo 8 se comenta lo referente al filtro y al ademe, por ejemplo: Graficas granulométricas o lo métodos de diseño del filtro granular.

En el capítulo 9 se aborda la supervisión en la rehabilitación, se enumeran los pasos para la recopilación de información como es la calidad del agua, la estratigrafía, el croquis de localización, etcétera.

# 1

## EFICIENCIA DE POZOS

En el medio de la explotación de aguas subterráneas es conocida la gran frecuencia con que los pozos funcionan ineficientemente; pero incluso pozos que se suponen eficientes, no lo son, ya que en su construcción o en la rehabilitación no se aplicó toda la tecnología disponible hoy en día.

En cualquier sistema donde tenga lugar una transformación o transmisión de energía, la eficiencia es la capacidad que tiene el sistema para realizar estos procesos, considerando que éstas nunca son totales al existir pérdidas por fricción, calor, ruido, etc. Comúnmente se define a la eficiencia, como la relación entre la energía proporcionada al sistema y la que se recupera del mismo, expresado generalmente como un porcentaje.

Dentro del sistema "pozo de agua" se tienen dos áreas de eficiencia: la eficiencia del sistema de bombeo y la eficiencia del pozo y acuífero, como se muestra en la Ecuación 1.1 (NOM-006-ENER).

$$\eta = \frac{P_s}{P_e}(100) \quad \text{Ecuación 1.1}$$

donde:

$$\begin{aligned} P_s &= \text{Potencia de salida de la bomba,} \\ &= \text{en watt} \\ P_e &= \text{Potencia de entrada al motor, en} \\ &= \text{watt} \end{aligned}$$

Cualquier sistema de bombeo para pozo profundo que utilice la energía eléctrica como medio energético para sus fines y que, derivado del diagnóstico de eficiencia electromecánica ésta resulte menor o igual al 52-64 por ciento en forma combinada, esto es, del conjunto bomba-motor, deben efectuarse acciones de rehabilitación o sustitución de los equipos electromecánicos, con el propósito de elevarlos a los niveles establecidos en la Tabla 1.1 como mínimo (NOM-006-ENER, Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozos profundos en operación – límites y métodos de prueba). Las acciones de rehabilitación o sustitución pueden estar dirigidas al motor

Tabla 1.1 Valores mínimos de eficiencia para sistemas de bombeo para pozo profundo en operación

Intervalo de potencia		Eficiencia electromecánica
kW	hp	%
5.6 - 14.9	7.5 - 20	52
15.7 - 37.3	21 - 50	56
38.0 - 93.3	51 - 125	60
94.0 - 261	126 - 350	64

Referencia de la NOM-006-ENER

eléctrico, a la bomba, a la estructura del pozo profundo, o a una combinación de éstos, según sea el caso, de tal forma que el conjunto de éstas den como resultado los valores de eficiencia electromecánica establecidos en la Tabla 1.1. El alcance de los trabajos de rehabilitación o sustitución requeridos para lograr el incremento de eficiencia en el equipo electromecánico, será determinado de común acuerdo entre el propietario del equipo y la empresa o taller a que se le asignen los trabajos, compartiendo en partes iguales la responsabilidad en la obtención de resultados. Con base en lo anterior, la empresa o persona física encargada de la rehabilitación o sustitución del equipo de bombeo debe conocer el alcance y objetivo de los trabajos y si éste no es capaz de garantizarlos, comunicárselo al propietario. En la práctica, a estas dos eficiencias suele llamársele "eficiencia del sistema de bombeo". La eficiencia de un pozo es su efectividad para captar agua del acuífero; como un pozo no necesita una potencia de entrada para que fluya el agua dentro de él, esta eficiencia no se puede medir con la división de potencia de salida entre la potencia de entrada, por lo que es necesario desarrollar otros métodos para medirla. Para comprender fácilmente estos métodos, se deben conocer las causas que pueden producir ineficiencia en el pozo.

### 1.1. PÉRDIDAS DE EFICIENCIA DEBIDAS A LAS CARACTERÍSTICAS DEL ACUÍFERO

Las características del acuífero rigen la capacidad de entrada del agua al pozo. Las principales características del acuífero son: su tamaño y grado de consolidación, sus límites, uniformidad, arreglo granulométrico, permeabilidad, trans-

misividad, composición química de los materiales y del agua que determinan el grado de corrosión e incrustación. Estas características son aplicables básicamente a acuíferos constituidos por materiales granulares, que se comportan de acuerdo a la ley de Darcy, cuando se trata de un acuífero en rocas kársticas o de rocas compactadas y fracturadas, la determinación de algunos parámetros es imposible y en otros tendrá un valor sólo relativo, para efectos de comparación en la misma región. Estas características son incontrolables, pues reflejan condiciones naturales, a las que se tiene que adaptar el proyecto del pozo en la mejor forma posible.

Ecuación de Darcy.

$$Q = KpAi \quad \text{Ecuación 1.2}$$

donde:

- $Q$  = Caudal en, metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ )
- $A$  = Área hidráulica en, metros cuadrados ( $m^2$ )
- $i=dh/dx$  = Gradiente de permeabilidad
- $kp$  = Coeficiente de permeabilidad

La pérdida de carga originada en el acuífero se refleja en el descenso del nivel dinámico necesario para que el agua fluya al pozo en régimen laminar y depende, además, de las características antes mencionadas, del caudal bombeado y, en menor medida del diámetro del pozo.

Las pérdidas de carga en el acuífero pueden ser de dos tipos:

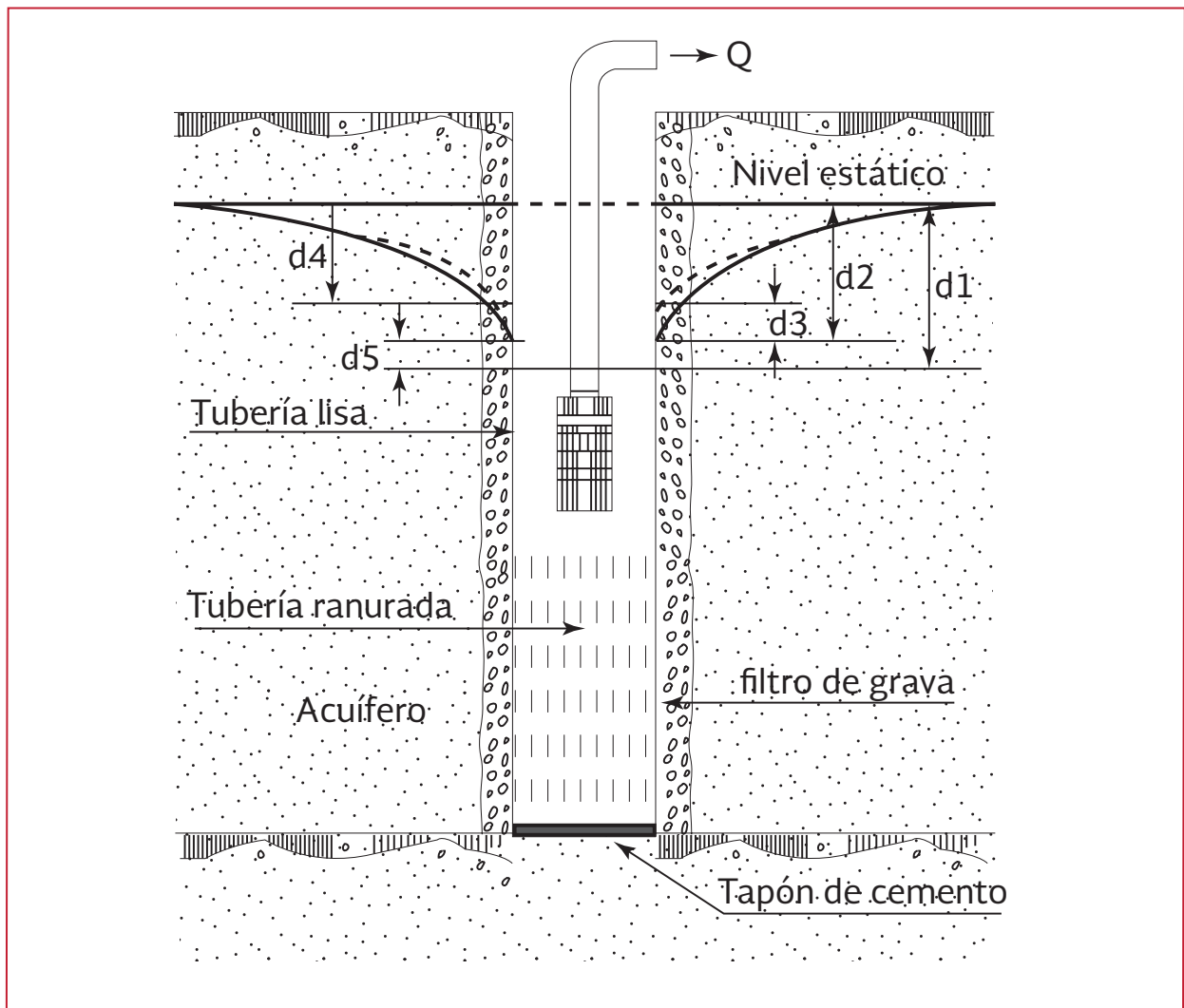
- En primer lugar, deben considerarse las que se producen en zonas más alejadas del pozo, donde la velocidad de circula-

ción del agua hacia el mismo es lenta, siendo el régimen laminar y cumpliéndose la ley de Darcy

- En segundo lugar están las que se producen en las inmediaciones del pozo, donde la velocidad del agua entre los poros del acuífero aumenta como consecuencia de un estrechamiento de las líneas del flujo radial hacia dicho pozo. En este caso, el régimen no es laminar, no se cumple la ley de Darcy, y el descenso producido en este tramo del acuífero es proporcional a una cierta potencia del caudal Ver Ilustración 1.1

- d1 = Descenso observado en metros (metros)
- d2 = Descenso en exterior del entubado en metros (metros)
- d3 = Descenso en el empaque de gravas y por régimen turbulento en las proximidades del pozo en metros (metros)
- d4 = Descenso teórico en metros (metros)
- d5 = Descenso al aprovechar el entubado del pozo (Filtro) en metros (metros)

Ilustración 1.1 Descenso por efectos de bombeo en pozo





## 1.2. PÉRDIDAS DE EFICIENCIA DEBIDAS A LAS CARACTERÍSTICAS DEL POZO

Las características del pozo afectan su eficiencia en forma determinante y la detección práctica de posibles deficiencias se explica en el Capítulo 2, pero en términos generales éstas se manifiestan como un descenso en el nivel dinámico para un caudal dado, originado por las siguientes causas:

- Al pasar el agua por las ranuras del cedazo al interior del pozo, se tiene una pérdida de carga. Si la velocidad es grande, la pérdida es proporcional al cuadrado del caudal, lo que resulta más crítico si el diseño del pozo no es adecuado, pudiendo llegar a ocasionar grandes descensos en el nivel dinámico
  - En los alrededores del pozo aumenta la velocidad de entrada del agua, con el consiguiente aumento del número de Reynolds, superando el valor matemático admisible para la validez de la ley de Darcy, por descenso es proporcional a cierta potencia del caudal (1 a 3.5)
  - La pérdida de carga por la entrada del agua en la bomba, sólo tiene importancia en algunas bombas sumergibles en que la succión de la bomba está por encima del cuerpo de ella y éste deja muy poco espacio entre él y las paredes del pozo
  - El movimiento del agua desde la zona filtrante hasta la bomba, produce una pérdida de carga, aunque esta pérdida normalmente no reviste mayor importancia
- Las pérdidas en el entorno del acuífero próximo al pozo pueden reducirse mediante un proceso de desarrollo adecuado. Las pérdidas en el propio pozo, tanto las debidas al empaque de grava como a los filtros, se aminoran con un buen diseño de estos elementos. Se aconseja que la velocidad del agua al atravesar los filtros no supere los 3 cm/s. Al conjunto formado por las pérdidas en el entorno del acuífero próximo al pozo y a la totalidad de las pérdidas en el mismo pozo es lo que se ha denominado. de un modo general, como pérdidas de carga

### 1.2.1. MÉTODO DE RORABAUGH

Una forma de medir la eficiencia de un pozo es por medio de la fórmula de Rorabaugh (Vargas & Arellano, 2002), que analiza el descenso del nivel dinámico del pozo:

$$S_p = BQ + CQ^n \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Donde:

- $S_p$  = Descenso en el pozo (nivel dinámico - nivel estático) en (metros)
- $Q$  = Caudal de bombeo en metros cúbicos por día ( $m^3/día$ )
- $B$  = Coeficiente de las pérdidas de circulación en la formación
- $C$  = Coeficiente de las pérdidas de circulación en el pozo
- $n$  = Exponente dependiente de la severidad de la turbulencia

La fórmula indica que el descenso de nivel en el pozo es debido a la suma de dos causas: la pri-

mera se debe a las condiciones del acuífero, y es proporcional al caudal, la segunda, a las condiciones particulares del pozo, la cual es proporcional a una potencia del caudal que varía según sea la característica del régimen laminar, de transición o turbulento. Como las características del acuífero no se pueden cambiar, éstas no influyen en la medición de la eficiencia y sólo se toma como un punto de comparación, por lo tanto,  $(B Q)$  indica una característica de la zona acuífera, éste descenso es el valor que se tendría en el caso hipotético de un "pozo perfecto". Las condiciones del pozo pueden afectarse dependiendo de las causas que las produjeron. El interés de un correcto diseño y construcción del pozo radica en que el producto  $(C Q_n)$  sea pequeño, lo que es igual a que la eficiencia del pozo sea mejor. Para lograr conocer los valores de  $B$ ,  $C$  y  $n$ , es necesario medir los descensos del nivel correspondientes a tres caudales diferen-

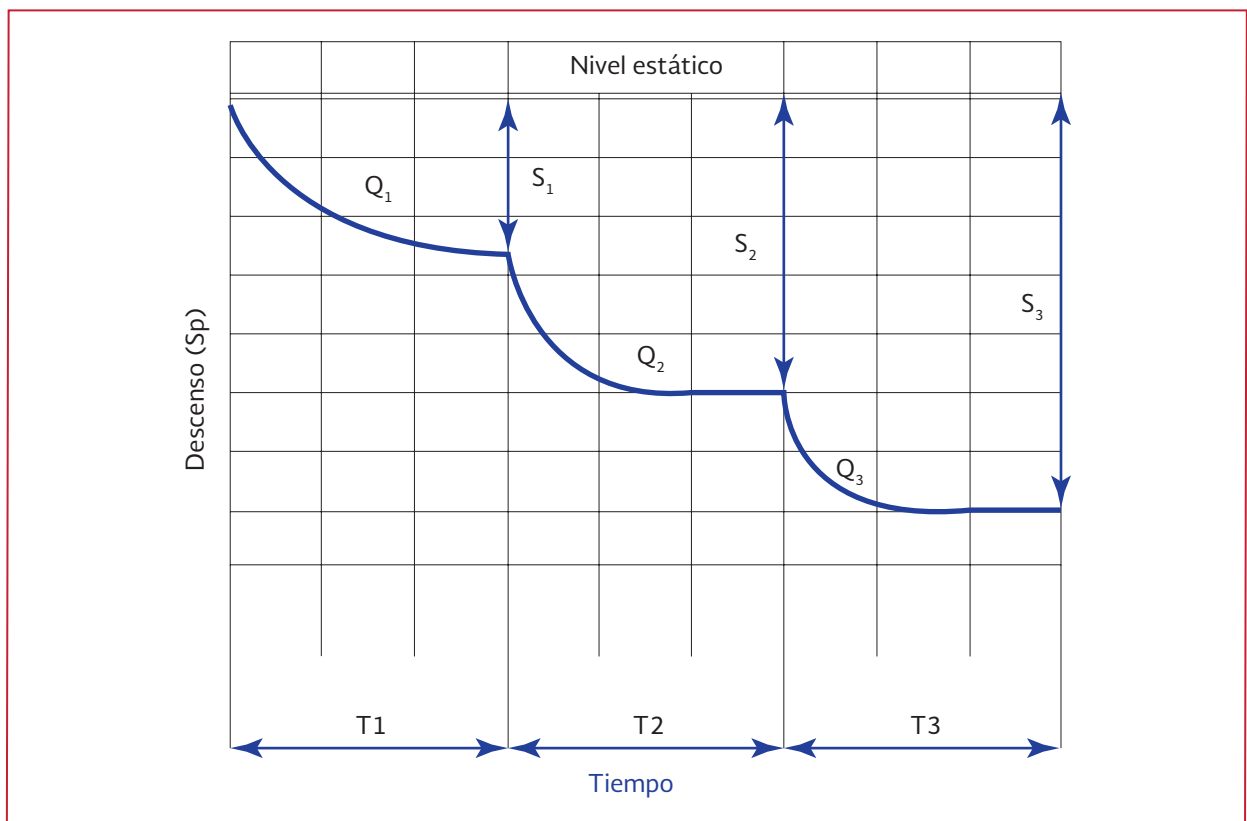
tes. Estos datos se pueden obtener de la prueba de aforo, a condición de que los tiempos, de duración de los escalones de bombeo sean de una misma duración y casi alcancen la estabilidad, como se muestra en la Ilustración 1.2, donde se observan los descensos máximos  $S_1$ ,  $S_2$  Y  $S_3$  para los distintos caudales correspondientes  $Q_1$ ,  $Q_2$  Y  $Q_3$ , se deben excluir los valores extremos y de preferencia el valor del caudal al que opera el pozo se debe encontrar en medio de los otros.

Se toman tres pares de datos y se sustituyen en la Ecuación 1.3:

$$\begin{aligned} S_1 &= B Q_1 + C Q_1^n \\ S_2 &= B Q_2 + C Q_2^n \\ S_3 &= B Q_3 + C Q_3^n \end{aligned} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

La resolución analítica de este sistema de ecuaciones resulta compleja, aunque un adecuado

Ilustración 1.2 Gráfica de bombeos escalonados a partir de una prueba de aforo



programa matemático de computadora lo resuelve con facilidad. Si no se dispone de estos elementos auxiliares pueden utilizarse los métodos en base a tanteos.

Para interpretar correctamente la fórmula de Rorabaugh, o alguna de sus variantes, hay que tomar en cuenta la siguiente condición:

Si los caudales son pequeños, la velocidad de entrada del agua al pozo también lo es, y el régimen de flujo resulta laminar, con  $n$  igual a 1, siendo proporcional al caudal; por lo tanto en ese rango la Ecuación 1.3 no se puede utilizar, ya que ciertos efectos no se manifiestan. Si se observa que  $Sp/Q$  es constante se puede concluir que  $n=1$ , lo que no quiere decir que no existan pérdidas de carga en el pozo, sino que no se pueden separar los valores de  $B$  y  $C$ .

### 1.3. MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA

Una vez definidos los valores de  $B$ ,  $C$  y  $n$ , se calcula la eficiencia del pozo, dividiendo el descenso teórico ( $St$ ) entre el descenso en el pozo ( $Sp$ ); el descenso teórico es el cambio de nivel dinámico debido a las condiciones específicas del acuífero y el descenso en el pozo es el cambio total del nivel observado en el pozo. Representada con la fórmula de Rorabaugh la eficiencia es igual a:

$$\frac{St=(BQ)}{Sp=(BQ+CQ^n)} \quad \text{Ecuación 1.5}$$

$$ef = St/Sp \quad \text{Ecuación 1.6}$$

$$ef = 1 - (CQ^n/Sp) \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Esta eficiencia es constante si el régimen es laminar (velocidades pequeñas de entrada del agua al pozo), y empieza a disminuir rápidamente cuando el régimen se convierte en turbulento. La eficiencia sirve como un valor indicativo de cómo está construido el pozo y permite comparar pozos en la misma formación, si se toman iguales tiempos e iguales caudales.

El valor de  $n$  puede variar de 1 hasta 3.5. En régimen laminar,  $n$  es cercana a 1; a mayores velocidades pasa a turbulento, cambiando cuando  $n$  es del orden de 2. Estos valores pueden aumentar debido a otras causas como la disminución del espesor saturado y el aumento de la zona perimetral afectada por turbulencia al incrementar el caudal. Los valores más frecuentes de este exponente varían entre 2.5 y 2.9. Con frecuencia  $B$  incluye también pérdidas en el pozo proporcionales a  $Q$ , y no sólo pérdidas debidas al acuífero, pero es difícil separarlas, por lo que se considera como una sola, aunque en ciertas ocasiones se debe tomar en cuenta sobre todo cuando  $n$  se acerca a 1.

El coeficiente  $C$  de las pérdidas de circulación en el pozo, puede indicar, en forma comparativa, el estado del mismo (ver Ilustración 1.3). Ver Ilustración 1.3, la  $C$  de la Tabla 1.2 está calculada para  $n = 2$ , para utilizar estos valores cuando  $n$  es mayor de 2, se puede transformar esta  $C$  en una  $C'$  con la Ecuación 1.8:

$$C' = \frac{CQ^n}{Q^2} \quad \text{Ecuación 1.8}$$

Por ejemplo; a partir de los siguientes datos del aforo de un pozo, ver Tabla 1.3:

Se obtuvieron por el método de tanteos de  $n$  los valores:

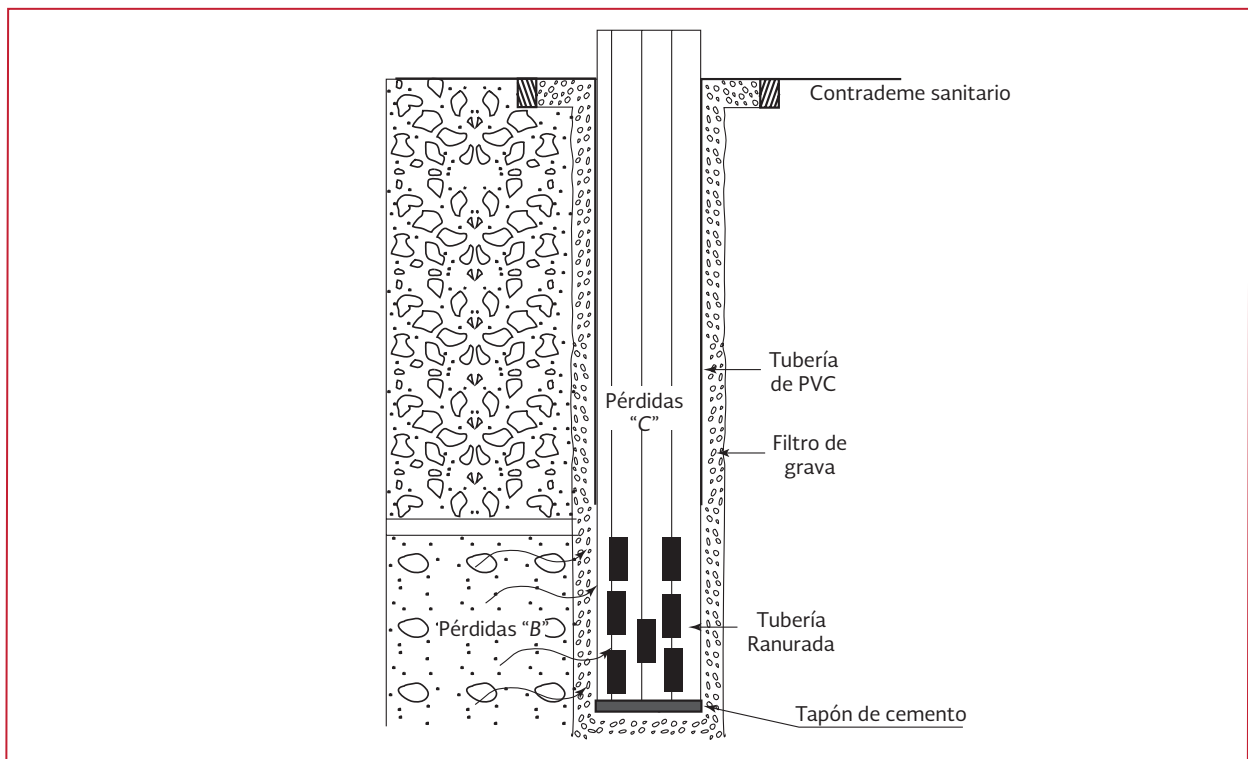
Tabla 1.2 Ejemplo de la relación entre el coeficiente C y el estado del pozo

Para $C \times 10^7$ igual a:	Estado del pozo
< 2.5	El pozo está bien construido y desarrollado
2.5-50	Principio de obturación
50-200	La obturación es importante
> 200	La obturación es fuerte y la rehabilitación del pozo puede ser difícil o imposible

Tabla 1.3 Ejemplo de los datos del aforo de un pozo

Descenso (S)	Caudal (Q)
metros	m <sup>3</sup> /día
4.1	1,728
10.1	3,456
19.1	5,184

Ilustración 1.3 Esquema de un pozo con sus componentes básicos. B representa el factor de pérdida en la formación y C el factor por pérdidas en el pozo (Vargas & Arellano, 2002)



$$B = 0.0021$$

$$C = 1.33 \times 10^{-7}$$

$$n = 2.634$$

Para poder comparar esta C con los valores de la Tabla 1.2 se efectúa la siguiente operación:

$$C' = \frac{1.33 \times 10^{-7} (5184)^{2.634}}{5184^2} = 3.01 \times 10^{-7}$$

Lo que indica una mínima obturación del cedazo, apenas de importancia.

En pozos en operación, donde el caudal de operación es similar a alguno de los escalones empleados durante el aforo y si no ha habido una variación notable en el nivel estático regional, se puede considerar que la B y n de operación sean las mismas del aforo; de modo que la variación a

la alta de  $C$  indicaría un deterioro en las condiciones del pozo.

La eficiencia de los pozos suele ser alta en acuíferos confinados poco permeables, puesto que la mayoría de las pérdidas son debidas al acuífero y puede ser baja en acuíferos muy permeables, si el pozo no ha sido bien construido, desarrollado o si requiere ser rehabilitado. No deben compararse eficiencias de pozos en acuíferos diferentes.

## 1.4. MEDICIONES PRELIMINARES

Muchos pozos en proceso de rehabilitación cuentan con equipo de bombeo en operación. En estos casos, antes de iniciar las labores de rehabilitación propiamente dichas, se deben efectuar una serie de pruebas con el propio equipo del pozo que se denominan "Mediciones Preliminares", cuya principal ventaja radica en su corta duración y bajo costo.

Hoy en día, la mayoría de los pozos están equipados con motor eléctrico, que trabaja a velocidad constante y dado que para estas mediciones se requiere variar las condiciones de trabajo de pozo y bomba, se debe contar con una válvula que permita realizar esta variación. La instalación necesaria para realizar este tipo de pruebas se ilustra en la Ilustración 1.4, aunque esta instalación puede sustituirse por un pitómetro u otro medidor de flujo. La validez de las mediciones previas radica en la observación de que al ser bombeado un pozo, la mayor proporción del descenso del nivel dinámico ocurre durante los primeros minutos de bombeo.

Como una aseveración de carácter práctico, a la que no se le debe dar una credibilidad excesiva, podemos decir que del 70 al 90 por ciento del descenso del nivel dinámico para un caudal dado, ocurre durante los primeros 30 min de bombeo. Por consiguiente, cuando a continuación se haga referencia a diversos escalones de prueba, su duración puede variar de pozo a pozo, según el tiempo en que cada uno de ellos alcance su estabilidad. Cuando sea posible, se debe intentar que los diversos escalones de una prueba sean de igual duración.

### 1.4.1. EQUIPO NECESARIO

Es importante aclarar que, al momento de realizar la prueba se debe contar con los documentos que avalen la calibración ante el Sistema Nacional de Calibración de todos los instrumentos involucrados en la medición de la eficiencia electromecánica. Para realizar las Mediciones Previas se requiere, además del equipo de bombeo, el siguiente equipo complementario (Ilustración 1.4):

- Sonda eléctrica
- Sonda neumática
- Tubo de descarga con orificio calibrado
- Piezómetro u otro medidor de caudal
- Válvula
- Manómetro
- Amperímetro
- Voltímetro
- Potenciómetro
- Tacómetro de punta
- Flexómetro

#### 1.4.2. MEDICIÓN DE LOS NIVELES DE BOMBEO Y PRESIÓN DE DESCARGA

##### **Sonda Eléctrica**

La sonda eléctrica consta de un carrete donde lleva un rollo de cable eléctrico tipo duplex y al final lleva un sensor, el cual se introduce al pozo, y al llegar al nivel del agua se cierra el circuito eléctrico, que es detectado por un miliamperímetro instalado en el carrete. El cable de la sonda se encuentra tiene marcas a cada metro.

##### **Sonda Neumática**

La sonda neumática cuenta con una manguera de 1/4" de diámetro, la cual se introduce al interior del pozo, a una profundidad mayor que el nivel dinámico; en la parte superior se instala una válvula de aire, un manómetro y una banda. Posteriormente se inyecta aire a presión hasta que el manómetro se estabiliza, esta lectura se convierte a metros y se calcula la profundidad del agua.

##### **Manómetro de Descarga**

Generalmente es tipo Bourdon y su lectura es directa.

#### 1.4.3. MEDICIÓN DE GASTO Y FRECUENCIA DE ROTACIÓN

##### **Tubo de Pitot**

Este instrumento correlaciona la carga de velocidad con el flujo. La distribución de la carga de velocidad en la tubería no es uniforme y para obtener una exactitud aceptable son necesari-

as múltiples puntos de medición en la sección transversal de la tubería. Se recomienda su uso en sistemas de bombeo con descarga a una tubería de presión. Las dimensiones mínimas de una instalación de este tipo se muestran en la Ilustración 1.4.

##### **Orificio calibrado**

Son generalmente circulares y se encuentran dentro del tubo horizontal o en su extremo de descarga. Cuando el orificio se encuentra en el tubo, la descarga no es libre y la carga debe medirse en puntos situados aguas arriba y abajo, respecto al orificio. Esta carga se mide generalmente con un manómetro. Los tubos de uso más generalizado en riego agrícola tienen localizado el orificio en la descarga del tubo. Las dimensiones mínimas de una instalación típica se muestran en la Ilustración 1.5 (NOM-006-ENER).

##### **Método de la escuadra**

Para medir el flujo en tubos horizontales es necesario medir una distancia horizontal y una vertical. La primera se mide desde la cúspide del interior del tubo hasta un punto de intersección con la componente vertical como se muestra en la Ilustración 1.6. Este método de medición de flujo es práctico y rápido, se aplica a tubos horizontales con descarga libre llenos o parcialmente llenos (NOM-006-ENER).

##### **Medición de la frecuencia de rotación de la bomba (r/min)**

Se puede determinar mediante un tacómetro y se emplea para la corrección de los valores de acuerdo a las leyes de afinidad de las bombas.

Ilustración 1.4 Medición de flujo con tubo de pitot (NOM-006-ENER)

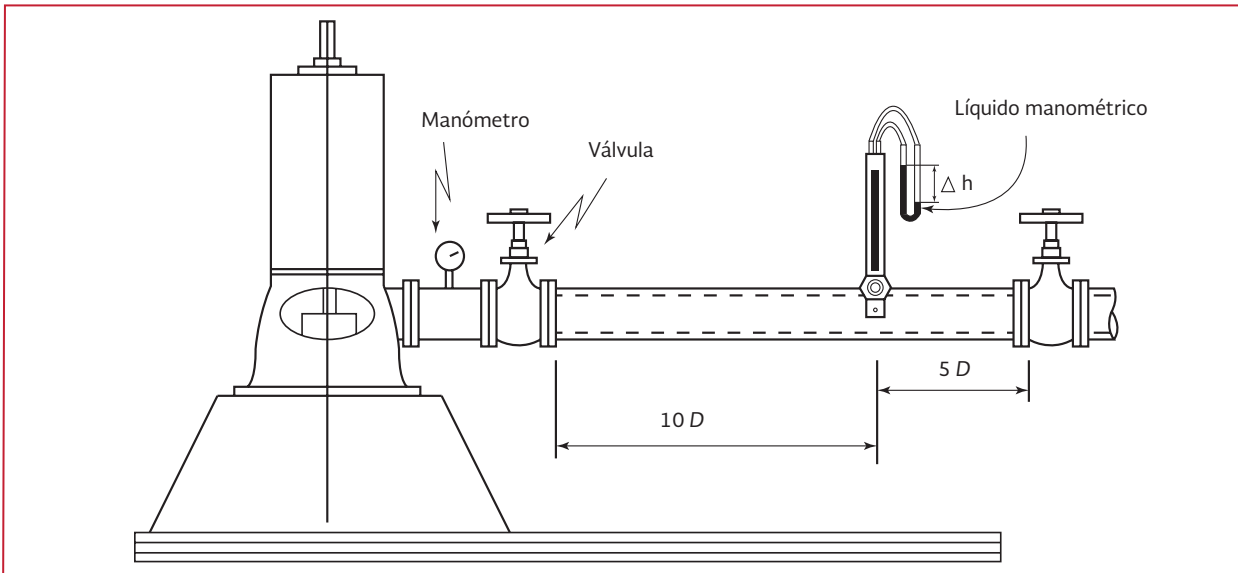
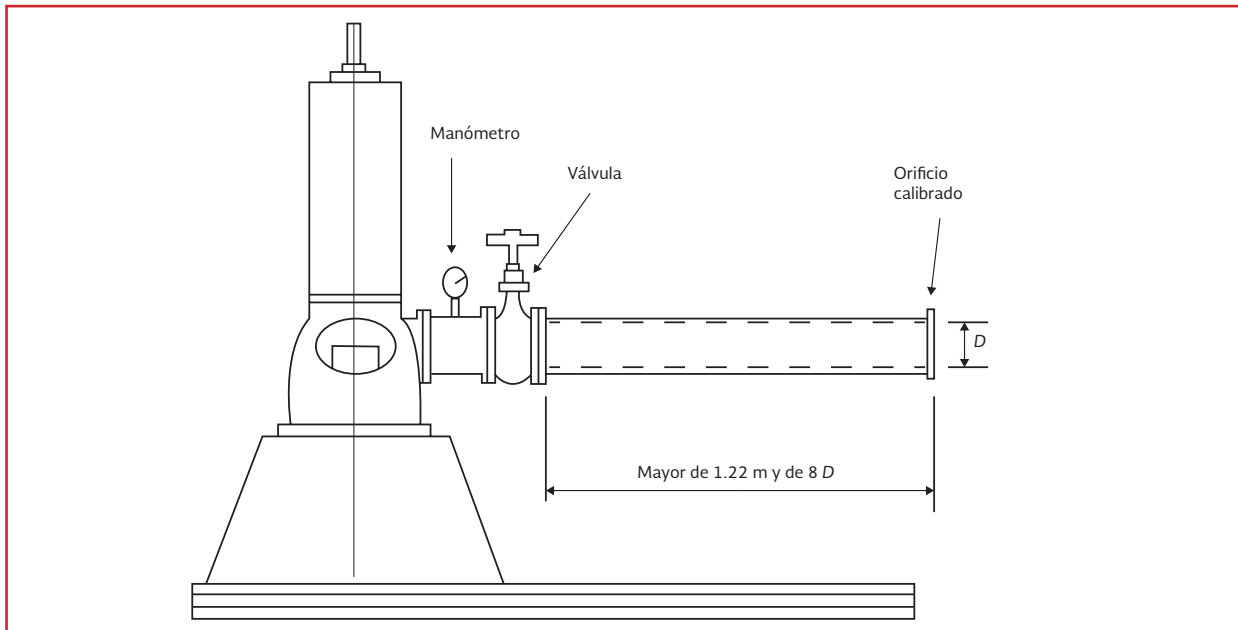


Ilustración 1.5 Medición de flujo mediante orificio calibrado (NOM-006-ENER)



De acuerdo con la NOM-006-ENER, cuando la prueba se realiza a frecuencia de rotación diferente a la nominal especificada por el fabricante, deben hacerse las correcciones de flujo, carga y potencia obtenidas durante la prueba, de acuerdo a las siguientes ecuaciones que expresan las leyes de afinidad.

$$q_0 = q_1 \left( \frac{n_0}{n_1} \right) \quad \text{Ecuación 1.9}$$

$$H_0 = H_1 \left( \frac{n_0}{n_1} \right)^2 \quad \text{Ecuación 1.10}$$

$$P_0 = P_1 \left( \frac{n_0}{n_1} \right)^3 \quad \text{Ecuación 1.11}$$

donde:

Parámetros nominales

- $q_0$  = Flujo en metros cúbicos por segundo ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $H_0$  = Carga total (metros)
- $P_0$  = Potencia requerida por la bomba (W)
- $n_0$  = Frecuencia de rotación, en r/min

Parámetros leídos durante la prueba

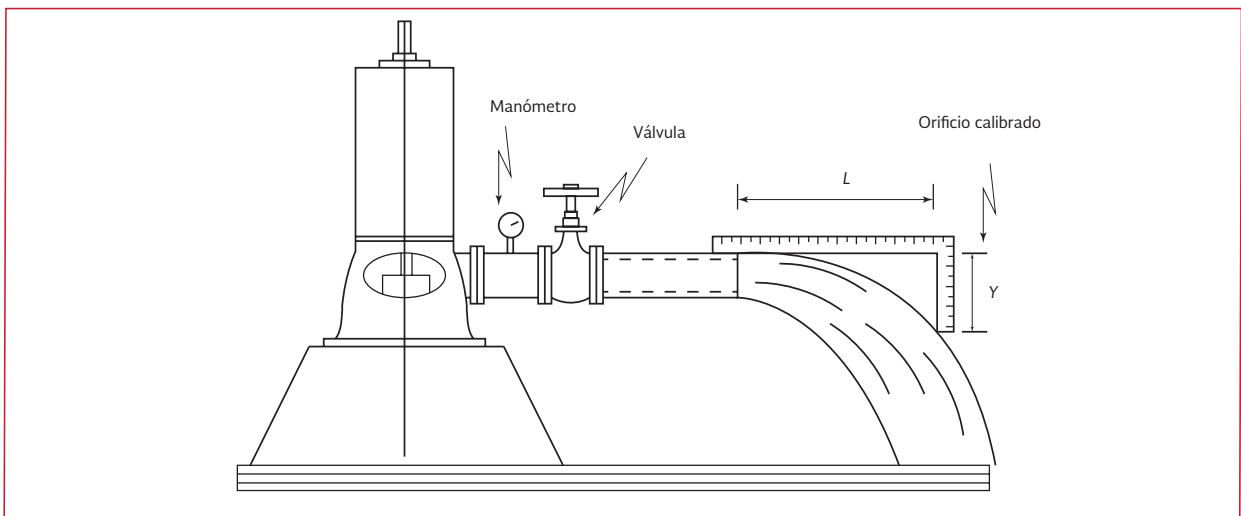
- $q_1$  = Flujo en metros cúbicos por segundo ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $H_1$  = Carga total (metros)
- $p_1$  = Potencia requerida por la bomba (W)
- $n_1$  = Frecuencia de rotación, en r/min

Lo anterior aplica si la desviación, en porcentaje, de la frecuencia de rotación con respecto a la frecuencia especificada por el fabricante no excede del  $\pm 20$  por ciento

#### 1.4.4. INTERPRETACIÓN DE LA PRUEBA

Todas las partes involucradas en el diagnóstico de la bomba deben hacer una inspección de la instalación, tan completa como sea posible, para determinar el cumplimiento de los requerimientos de la propia instalación y la conexión correcta de toda la instrumentación. En la satisfacción de estos requerimientos la bomba debe ponerse en marcha y, tanto la bomba como la instrumentación deben revisarse inmediatamente para identificar cualquier evidencia de mal funcionamiento. Debe realizarse también una revisión inmediata del nivel del agua, procediendo a realizar revisiones periódicas adicionales hasta que el nivel se estabilice en conformidad de las partes. Cualquier evidencia de mala operación o presencia de gas o material abrasivo dentro del pozo deberá indicarse en ese instante. También debe realizarse una revisión preliminar de todos los valores de la prueba para la conformación de las lecturas, además de realizarse una revisión final por si se percibe una mala operación (NOM-006- ENER). En caso de

Ilustración 1.6 Medición de flujo por el método de la escuadra (NOM-006-ENER)





que no se disponga de las curvas de operación, la eficiencia teórica se puede suponer con base en la fórmula de potencia:

$$kWh = \frac{9.81 Q h}{1000(\eta_b)(\eta_m)} \quad \text{Ecuación 1.12}$$

donde:

- $kWh$  = Potencia teórica hora (kWh)
- $Q$  = Caudal en litros por segundo (l/s)
- $h$  = Carga manométrica total (metros)
- $\eta_b$  = Eficiencia de la bomba (Bomba sumergible: 65 70 por ciento, bomba con motor exterior: 75 80 por ciento)
- $\eta_m$  = Eficiencia del motor (Motor eléctrico: 90 por ciento, motor de combustión: 80 por ciento)
- $1 m^3$  = 1000 litros

Dividiendo la potencia teórica entre los kW medidos con el potenciómetro (potencia real de entrada,  $kW_r$ ), se obtiene un "Factor de variación de potencia" ( $fvp$ ).

$$fvp = \frac{kW_r}{kW_T} \quad \text{Ecuación 1.13}$$

donde:

- $fvp$  = Factor de variación de potencial unidimensional

Un  $fvp$  menor que la unidad indica sistemas motor bomba de menor eficiencia a la que se considera adecuada al proyectar un sistema de bombeo, en contraste, valores superiores a la unidad señalan sistemas cuya eficiencia es óptima.

Al restar la potencia teórica a la potencia real de entrada obtendremos los kW que se pueden ahorrar al sistema; cantidad que multiplicada por el costo del kWh y las horas de operación permitirán evaluar la conveniencia de proceder a mejorar la eficiencia del sistema o no.

El Factor de Potencia se obtiene aplicando la fórmula:

$$FP = \frac{1000 kw_r}{1.73 (I)(V)}$$

Ecuación 1.14

Este factor debe ser del orden de 0.90 para que el sistema se pueda considerar dentro de las normas de la Comisión Federal de Electricidad y no hacerse acreedor a sanciones.

#### 1.4.5. SECUENCIA DE OPERACIONES

1. Medición de nivel estático
2. Arranque de la bomba con la válvula abierta. Una vez "estabilizado" el nivel dinámico, medición de éste, del tiempo transcurrido hasta la estabilización, de la presión en la descarga, del amperaje en las fases 1, 2 y 3, de la tensión entre las fases 1 2, 1 3 y 2 3, de la potencia consumida y de las revoluciones por minuto cuando el equipo sea de flecha. Estas medidas representan las condiciones normales de operación del pozo
3. Cerrar totalmente la válvula de la línea de descarga, si existe, y efectuar la misma serie de medidas enumeradas en el inciso 2. En estas condiciones se están tomando lecturas a caudal 0 y carga máxima
4. Cuando no existe ningún dispositivo de medición de caudal instalado en el pozo, se suspende el bombeo y se desconecta la bomba de la línea, se levanta y gira la

bomba lo que fuera necesario y se instalan los aditamentos de medición (manómetro, tacómetro y piezómetro) y los de descarga (válvula y tubo con orificio calibrado) en la Ilustración 1.5. Si se cuenta con dispositivo de medición de caudales, no se requiere de grúa para girar el equipo, ni de toda la instalación de orificio calibrado.

5. Se repiten la serie de mediciones con válvula abierta, con válvula cerrada y se cuentan las vueltas que da el volante entre estas dos posiciones
6. Accionando la válvula se regula el caudal y se cuentan las vueltas, hasta estabilizar el pozo en el mismo nivel dinámico establecido en las condiciones de operación y se repiten las lecturas
7. Por último se miden otros dos escalones regulando la válvula, mediante el número de vueltas, hasta obtener un punto intermedio entre el de operación y válvula abierta y el otro entre operación y válvula cerrada
8. Las lecturas obtenidas durante la prueba se procesan de manera similar a la empleada en la Tabla 1.4

#### Descripción de la tabla

- a) Altura piezométrica: Medición durante la prueba
- b) Caudal: Obtenido en tablas (apéndice de aforos)
- c) Presión manométrica: Medición durante la prueba

- d) Nivel dinámico: Medición durante la prueba
- e) Carga dinámica total = (presión manométrica x 10) + nivel dinámico
- f) Tensiones: Medición durante la prueba
- g) Tensión promedio  $(\text{tensión1} + \text{tensión2} + \text{tensión3}) / 3$
- h) Corriente: Medición durante la prueba
- i) Corriente promedio =  $(\text{amp1} + \text{amp2} + \text{amp3}) / 3$
- j) Potencia suministrada: Medición durante la prueba
- k) Revoluciones por minuto: Medición durante la prueba
- l) Factor de potencia =  $\text{Pot. suministrada} \times 1000 / (\text{tensión promedio} \times \text{corriente promedio} \times 1.73)$
- m) Eficiencia bomba motor real =  $\text{Carga dinámica total} \times \text{caudal} \times 0.0098 / \text{Pot. suministrada}$
- n) Potencia teórica =  $\text{Carga dinámica total} \times \text{caudal} \times 0.0098 / \text{eficiencia teórica motor bomba}$
- o) Factor de variación de potencia =  $\text{Potencia teórica} / \text{potencia suministrada}$
- p) Diferencia de potencias.  $\text{Potencia suministrada} - \text{Potencia teórica}$
- q) Costo de la ineficiencia 1 h =  $\text{Diferencia de tensión} \times \text{precio kW/h}$
- r) Capacidad específica =  $\text{Caudal} / (\text{nivel dinámico} - \text{nivel estático})$

***La normatividad mencionada en este capítulo está referida para el año 2014***

Tabla 1.4 Ejemplo de mediciones previas

Pozo:		Fecha.		Diámetros de: descarga. 8"		Orificio: 6"		
Nivel estático: 22.23 Observaciones: Agua limpia desde el arranque. Eficiencia teórica motorbomba ( $\eta_b \times \eta_g$ ): 72.00 %								
Precio : 195.55								
Conceptos	Condiciones actuales de trabajo	Válvula cerrada	3	4	5	6	7	8
Altura piezométrica (m)	31.00	0.00	6.00	15.00	30.00	36.00	46.00	55.00
Caudal (l/s)	28.63	0.00	12.60	19.91	28.16	30.85	34.87	38.13
Presión manométrica. (Kg/cm <sup>2</sup> )	4.50	9.48	8.49	6.96	4.52	3.34	1.55	0.00
Nivel dinámico (m)	116.24	22.23	31.43	46.63	70.89	82.54	100.36	115.48
Carga dinámica total (m)	116~24	117.03	116.33	116.23	116.09	115.94	115.86	115.50
Tensión 12 (V)	440.00	440.00	440.00	440.00	440.00	440.00	440.00	440.00
Tensión 13 (V)	440.00	440.00	440.00	440.00	440.00	440.00	440.00	440.00
Tensión 23 (V)	440.00	440.00	440.00	440.00	440.00	440.00	440.00	440.00
Tensión promedio (V)	440.00	440.00	440.00	440.00	440.00	440.00	440.00	440.00
Corriente 1 (A)	104.00	122.00	115.00	108.00	105.00	102.00	100.00	99.00
Corriente 2 (A)	105.00	120.00	115.00	108.00	105.00	102.00	100.00	98.00
Corriente 3 (A)	105.00	122.00	116.00	108.00	105.00	102.00	99.00	97.00
Corriente promedio (A)	104.67	121.33	115.33	108.00	105.00	102.00	99.67	98.00
Potencia suministrada (kWh)	62.94	75.73	63.21	61.66	63.14	65.22	70.56	72.36
Revoluciones por minuto (r/min)	1800.00	1800.00	1780.00	1780.00	1780.00	1780.00	1780.00	1800.00
Factor de potencia	0.79	0.82	0.72	0.75	0.79	0.84	0.93	0.97
Eficiencia bombamotor real (%)	51.82	0.00	22.72	36.78	50.74	53.74	56.12	59.65
Potencia teórica (kWh)	45.34	0.00	19.97	31.53	44.54	48.73	55.05	60.00
Factor de variación de potencia	0.00	0.00	0.32	0.51	0.71	0.75	0.78	0.83
Diferencia de potencias (kW)	17.60	0.00	43.24	30.13	18.60	16.49	15.51	12.35
Costo de la ineficiencia 1 h	\$3,441	\$0	\$8,455	\$5,891	\$3,637	\$3,224	\$3,033	\$2,416
Capacidad específica.	0.58		1.37	0.82	0.58	0.51	0.45	0.41

# 2

## DIAGNÓSTICO DE POZOS INEFICIENTES; SUS CAUSAS Y POSIBLES SOLUCIONES

Sin considerar la errónea localización del pozo, y asumiendo que ésta es adecuada; existen numerosas razones para que un pozo funcione en forma ineficiente, de las que se mencionarán las más comunes, sin considerar ni su importancia relativa, ni la frecuencia con que se presentan, pues estas condiciones varían notablemente de región a región y aun de pozo a pozo en una misma zona.

El objetivo de este capítulo es proporcionar al técnico responsable del mantenimiento y operación de pozos una herramienta práctica para detectar el mal funcionamiento de ellos y las posibles soluciones a esta situación. Tanto la manifestación del problema, como su solución se presentan en forma resumida, pues una vez determinados se espera se consulten los capítulos siguientes donde se trata con mayor amplitud cada tema.

Para cada una de las causas de ineficiencia se pueden enumerar varios efectos del problema y soluciones, sin que esto quiera decir que se den todas ellas en un mismo pozo.

Desde hace algunos años se ha empleado el registro de vídeo, con el que se obtiene un registro visual a lo largo del pozo, herramienta que se ha vuelto de gran utilidad para la detección de

muchos de los problemas que se presentan en los pozos y casi indispensable para planear sus soluciones; por consiguiente en la actualidad es habitual que una rehabilitación lleve implícita la corrida de al menos uno y a veces varios de estos registros.

En la Tabla 2.1 se han dividido en cuatro grupos las causas de mal funcionamiento de los pozos; en el primero se agrupan los originados por un mal diseño y que se hubieran evitado con un correcto diseño de pozo. Existe otro grupo de problemas ocasionados por errores constructivos, pero ni el aspecto del diseño del pozo ni su construcción son tema de este libro, por lo que solamente serán comentados parcial y brevemente cuando se requiera por estar relacionado a la rehabilitación. Los otros dos grupos son las causas debidas a defectos en la operación y problemas regionales en el acuífero.

### 2.1. DEFECTOS DE DISEÑO

Si un pozo ha sido mal diseñado, por no haberse considerado las condiciones geohidrológicas regionales, las encontradas durante la propia exploración o los requerimientos de la obra, es probable que nunca trabaje eficientemente; no obstante, en muchos casos existen soluciones o al menos paliativos al problema, mismos que se

presentan a continuación y que no se deben considerar como reglas generales, por lo que en cada caso particular es necesario llevar a cabo una recopilación y análisis de la información técnica de que se disponga, ponderándose, además, las consecuencias económicas que se deriven.

### 2.1.1. POZOS INCOMPLETOS

Se llama "pozo incompleto" a aquel que no atraviesa completamente el acuífero, a diferencia del "pozo completo" que si lo hace (Ilustración 2.1). El pozo incompleto concentra el flujo del agua en menor área, lo que resulta en mayores velocidades de entrada para un caudal dado y la posibilidad de arrastre de finos hacia el pozo.

La condición de pozo incompleto se puede detectar por comparación de su columna estratigráfica con la de otros pozos de la región o

porque presenta una menor capacidad específica que la de pozos vecinos completos.

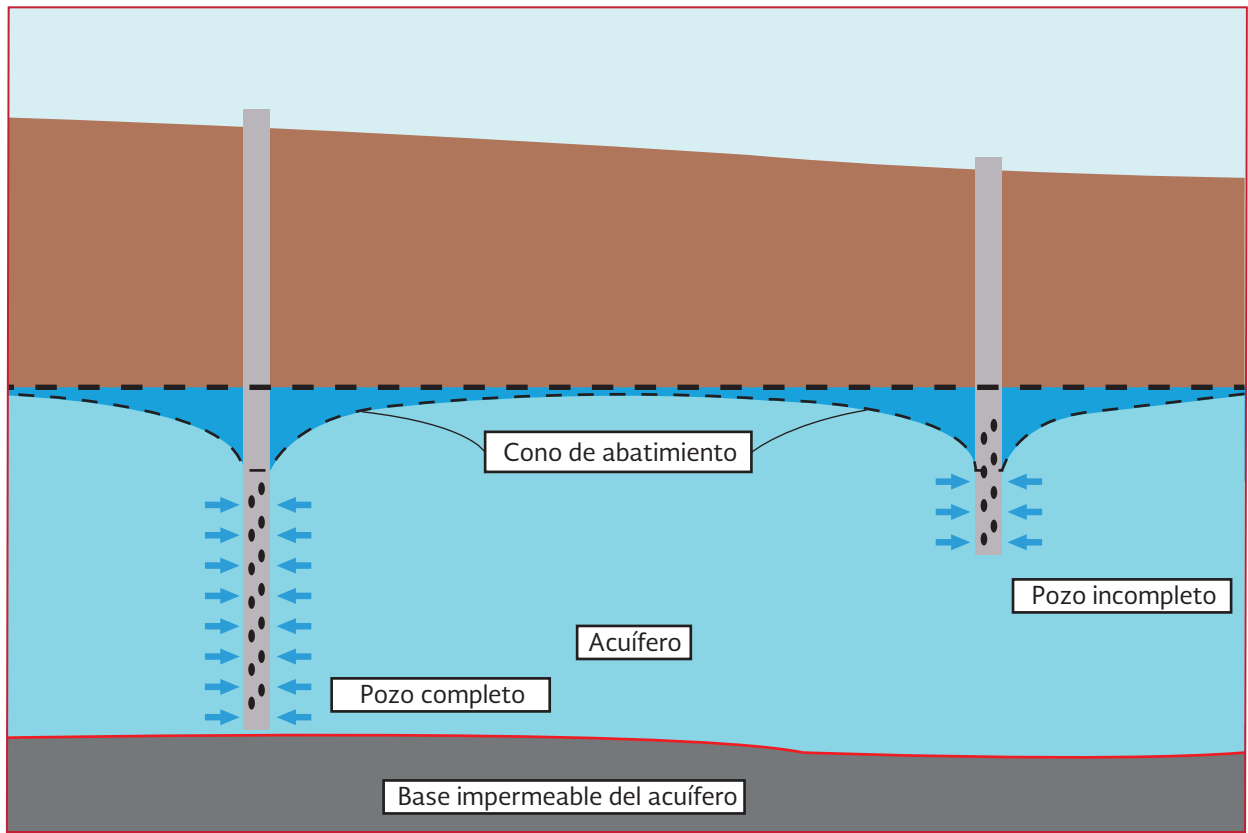
La comparación del funcionamiento de pozos completos e incompletos en regiones en que se presentan los fenómenos de incrustación o de corrosión, ha mostrado que los dos fenómenos actúan más enérgicamente sobre los segundos que sobre los primeros y que en consecuencia, la vida útil del pozo incompleto es más corta que la del completo.

La única solución factible a los problemas que pueda ocasionar un pozo incompleto, consiste en volverlo completo, lo que se puede conseguir si el pozo se hubiese terminado con un tapón de fondo de cemento (sin "punta de lápiz") y contara con ademe de suficiente diámetro (al menos 30.48 cm, 12"), que permitiera profundizarlo, colocándole un nuevo ademe y cedazo con el filtro correspondiente.

Tabla 2.1 Causas de ineficiencia de los pozos para agua

Defectos de diseño	Pozo incompleto
	Cedazo en exceso
Defectos constructivos	Falta de cedazo
	Información litológica inadecuada
	Filtro granular o cedazo mal diseñado
	Muro mal realizado o interpretado
	Selección inadecuada de bomba
	Defectuosa protección sanitaria y química
	Fluidos de perforación inadecuados
Defectos operacionales	Falta de desarrollo del pozo
	Filtro granular mal colocado
	Defectos en la colocación del ademe
	Falta de verticalidad del pozo
	Materiales defectuosos o inadecuados
Problemas regionales	Falta de mantenimiento del pozo
	Falta de mantenimiento de la bomba
	Falta de reposición del filtro granular
	Arranques y paros frecuentes del equipo de bombeo
Problemas regionales	Aguas corrosivas
	Aguas incrustantes
	Bacterias ferruginosas
	Abatimientos regionales de los niveles freáticos

Ilustración 2.1 Pozos completos e incompletos



### 2.1.2. CEDAZO EN EXCESO

Es práctica frecuente, aunque errónea, el dejar toda la superficie de contacto pozo acuífero a partir del nivel estático además con cedazo. Este diseño tiene, de principio el inconveniente del innecesario gasto en cedazo relativamente más caro que el tubo ciego. El exceso de cedazo ofrece la ventaja de favorecer una alta capacidad específica y por tanto el bajo consumo de energía por unidad de caudal; en cambio el pozo producirá menos agua que la que sería factible si tuviera un cedazo más reducido, situado en la porción inferior del acuífero.

Si el exceso de cedazo se encuentra en la porción superior del acuífero, y se quiere incrementar la producción, se puede encamisar la porción ex-

cedida con un ademe ciego del diámetro nominal inmediato inferior al empleado en el pozo, este encamisado debe apoyarse ligeramente en un anillo de cemento previamente colado y dejarse suspendido desde la superficie. Una vez colocada la camisa, el pequeño espacio anular entre las dos tuberías se rellena con lechada de cemento. Cuando fragüe esta lechada se rompe el tapón de cemento.

Otra manifestación del problema resulta en la producción de sólidos, cuando se adema con cedazo estratos de limos y arcillas, que son imposibles de detener, aun con un filtro granular muy fino. Cuando se conoce bien la estratigrafía del pozo y por tanto la posición de los acuíferos, la observación de un registro de vídeo puede mostrar el exceso de cedazo.

Si el exceso de cedazo dejó abiertas formaciones de materiales finos que no pueden ser detenidos por el filtro granular, el problema se puede solucionar mediante cuidadosas cementaciones de las zonas problema, esperar el fraguado y posteriormente romper el tapón, quedando así un anillo de cemento en la zona del filtro granular y acuífero inmediato al pozo. Esta solución presenta el inconveniente de que el propio anillo impedirá la reposición de grava abajo de él.

### 2.1.3. FALTA DE CEDAZO

El defecto de cedazo presenta, como es natural, manifestaciones contradictorias al exceso, pero que también resultan nocivas para el buen funcionamiento del pozo.

La concentración del flujo en un área reducida resulta en altas velocidades de entrada del agua al pozo y consecuentemente un mayor riesgo de arrastre de finos, así como más probabilidades de corrosión e incrustación del ademe.

Un pozo con poco cedazo presenta una baja capacidad específica al compararlo con otros de características similares en profundidad en la misma región, lo que se traduce en pozos muy productores pero con altos consumos energéticos unitarios. Cuando se conoce bien la estratigrafía del pozo y por tanto la posición de los acuíferos, la observación de un registro de vídeo puede mostrar el defecto de cedazo.

Cuando la falta de cedazo se presenta en un pozo completo no existe solución al problema. Si se trata de un pozo incompleto, existe la posibilidad de re perforarlo hasta el fondo del acuífero, colocándose cedazo en los tramos adecuados, disminuyendo así el defecto original.

### 2.1.4. INFORMACIÓN LITOLÓGICA INADECUADA

El diseño de un pozo se basa esencialmente en las muestras colectadas durante la perforación exploratoria, apoyadas por la interpretación de los registros geofísicos del pozo; de manera que un muestreo o registros inadecuados, o una mala interpretación de los mismos, inevitablemente tiene como consecuencia un mal diseño, con todos los problemas a él asociados. El problema se manifiesta en innumerables formas (pozo seco o de baja producción, producción de agua con sólidos, mala calidad del agua, etc.) , según cual haya sido la falla del diseño. Consecuentemente, los problemas originados por una inadecuada información exploratoria pueden o no tener solución, dependiendo de cuál sea su manifestación.

### 2.1.5. FILTRO GRANULAR O CEDAZO MAL DISEÑADO

Aun cuando la exploración y muestreo se realicen correctamente, el filtro granular o el cedazo pueden estar mal diseñados.

El problema se observa en un pozo productor de sólidos, con una disminución gradual de la capacidad específica, hasta un cierto tiempo en que la capacidad específica se estabiliza, lo que coincide con un desgaste excesivo del equipo de bombeo. Esto se debe a que el pozo se va llenando gradualmente de sólidos, hasta el punto en que la bomba los alcanza a succionar; a partir de entonces extrae los sólidos, lo que provoca un desgaste acelerado del equipo.

El defecto en la selección del filtro granular generalmente consiste en el grosor excesivo de sus

gránulos y la consiguiente incapacidad de filtrado. La única solución permanente a este problema, siempre y cuando el diámetro del pozo lo permita, consiste en colocar un nuevo cedazo y un filtro granular correctamente diseñado en el interior del pozo.

Una solución temporal, que por lo general ofrece buenos resultados, consiste en desazolvar el pozo hasta alcanzar la profundidad de proyecto y a continuación desarrollarlo energicamente. Como no se ha solucionado el problema de origen, la acumulación de finos se reanuda al cabo de un cierto tiempo, pero el pozo puede funcionar correctamente durante un lapso lo suficientemente largo como para justificar el gasto de la rehabilitación.

#### 2.1.6. AFORO MAL REALIZADO O INTERPRETADO

La bomba con que se explota un pozo se debe seleccionar, en primer lugar, de acuerdo a las condiciones impuestas por el pozo y en segundo, a las características hidráulicas y constructivas de la obra de abastecimiento, como longitud de la conducción, carga manométrica a partir de la superficie, válvulas, codos, etcétera.

A este respecto, se pueden presentar dos condiciones opuestas e igualmente nocivas para la explotación: la bomba instalada no es capaz de provocar un abatimiento del nivel dinámico, suficiente para alcanzar el caudal óptimo de explotación del pozo. En esta condición no se está cumpliendo con el objetivo de la prueba, que es precisamente establecer dicho caudal y el pozo resulta subexplotado. Si por el contrario el punto óptimo ha sido rebasado y por defecto en la interpretación se selecciona una bomba que exceda la capacidad

del pozo, el costo unitario del agua extraída será excesivo y se llega al caso de que el nivel dinámico alcance la succión de la bomba, con el consecuente "bloqueo" en la descarga, ocasionado por la extracción de agua mezclada con aire.

La selección de la bomba de aforo depende de la experiencia local en pozos anteriores, de los indicios durante la construcción del pozo y de la geometría de éste, condiciones todas ellas bastante subjetivas por lo que cabe una cierta posibilidad de error en dicha selección. Para minimizar el costo de esta posibilidad se debe establecer como un procedimiento de rutina el ensayo de aforo (ver Ilustración 2.2).

Los datos del aforo se presentan en la gráfica correspondiente, cuyo correcto análisis e interpretación indica si la bomba de aforo fue la adecuada al pozo y permite la selección del equipo de explotación idóneo para el pozo probado.

Como ocurre con cualquier mecanismo; para que una bomba trabaje eficientemente debe ser seleccionada de acuerdo a las condiciones específicas de trabajo que le impone el medio, en éste caso el sistema pozo acuífero. Una mala selección de bomba podrá ocasionar la subexplotación del pozo con el consiguiente desperdicio de la fuente, o la sobreexplotación que puede regar al bombeo aire y agua ("boqueo"). Los dos casos se manifiestan en una baja eficiencia del sistema.

#### 2.1.7. MALA PROTECCIÓN SANITARIA Y QUÍMICA DEL POZO

El acuífero explotado por un pozo, es susceptible de ser contaminado química o bacteriológicamente, cuando el propio pozo comunica a dicho



Ilustración 2.2 Aforo de Pozos



acuífero con una fuente de contaminación. Para evitarlo, el pozo debe contar con un contra-ade-me bien cementado que aislé al acuífero.

El problema se detecta mediante un análisis químico y bacteriológico del agua extraída del pozo. Cuando el pozo se utiliza para extraer agua potable se presenta una alta incidencia de enfermedades relacionadas con bacterias patógenas presentes en aguas contaminadas, o con algún ion nocivo.

El proporcionar a un pozo ya terminado una adecuada protección contra la contaminación, resulta imposible en forma económicamente práctica, por lo que la única solución a este problema consiste en eliminar la contaminación en su fuente. Ahora, si se trata de una explotación de aguas

agrícolas o industriales, la mala calidad del agua se puede manifestar en defectos en el producto agrícola o industrial.

## 2.2. DEFECTOS CONSTRUCTIVOS

Es frecuente que un pozo bien diseñado se construya inadecuadamente debido a los procedimientos constructivos empleados. Los problemas más frecuentes son:

### 2.2.1. FLUIDOS DE PERFORACIÓN INADECUADOS

Cuando un pozo se construye con perforadora rotaria directa, es indispensable el uso de un fluido de perforación que mantenga estables sus

paredes, enfríen la barrena y levanten hasta la superficie el recorte de la perforación. Este fluido de perforación puede ser aire, agua, lodos fabricados a base de sustancias degradables o el más usual, el lodo bentonítico.

La popularidad del lodo bentonítico se debe a su bajo costo de adquisición con respecto a los lodos autodegradables y la menor inversión en equipo necesario, respecto a la perforación neumática o a base de agua sola. El lodo forma un enjarre periférico a la perforación (el "cake") que es capaz de mantener estables las paredes, sin que penetre mucho en la formación, pues en caso contrario el mismo lodo impedirá o dificultará la entrada de agua al pozo. Esta situación no es grave si se tiene un buen control de los lodos utilizados, como la densidad y viscosidad.

Si la penetración del lodo no es muy profunda, los restos de la bentonita se eliminan durante el desarrollo, que es una de las últimas etapas constructivas del pozo. Si esto no ocurriera en ese momento, se puede realizar aunque haya pasado bastante tiempo. Si durante la construcción de un pozo, se provoca una penetración del acuífero con bentonita a profundidad y si no se elimina mediante el desarrollo, resultará una captación de menor capacidad específica que pozos similares de la región, pudiendo llegar en casos extremos a ser totalmente improductivo (ver Ilustración 2.3).

### 2.2.2. FALTA DE DESARROLLO DEL POZO

El desarrollo de un pozo se debe efectuar inmediatamente después de su terminación y antes

Ilustración 2.3 Construcción de pozos



de su aforo. Consiste esencialmente, en una agitación controlada del agua en el pozo, cuya finalidad es eliminar residuos de bentonita, limpiar el filtro granular, si lo hay, y remover los materiales finos del acuífero en su entorno. Existen varios métodos de desarrollo que se comentan en el Capítulo 4. La falta de desarrollo provoca una menor capacidad específica que la de pozos similares de la región.

Si el desarrollo no se realizó al terminar el pozo, se puede realizar posteriormente, por lo general, con buenos resultados. En esta situación es común que al aforar el pozo nuevamente, resulte que la antigua bomba con que venía operando es de capacidad inferior a la conveniente, según las nuevas condiciones del pozo.

### 2.2.3. FILTRO GRANULAR MAL COLOCADO

Aun cuando el filtro esté bien diseñado, puede ser mal colocado en el pozo, sea por una mala práctica de las operaciones de engravado, o bien por las características físicas de algún estrato. El defecto de colocación puede ser un vertido en el pozo demasiado lento, que permite que el filtro se clasifique respecto a tamaños, de modo que el resultado son pequeños estratos alternados de material grueso, medio y fino, ninguno de los cuales cumple con las características del proyecto.

En cambio, si la colocación es demasiado rápida o si el espacio anular es muy reducido, el filtro se puede "puentear" al acuñarse los gránulos entre el ademe y el terreno. Un efecto semejante se tiene cuando formaciones inestables, generalmente arcillosas, se anillan alrededor del ademe, impidiendo la bajada del filtro. El problema se manifiesta por la entrada de finos al pozo.

Si el problema se debe a la estratificación del filtro granular, o a una formación que se "anilla" alrededor del ademe ciego, no existe solución al problema excepto el encamisado y colocación de un nuevo filtro granular. Si el anillo se formara frente al cedazo, se puede romper mediante un enérgico desarrollo que permita la gradual sustitución del material del anillo por el del filtro.

Si el defecto consiste en el "puenteo" del filtro, existe la posibilidad de romper dicho "puente" mediante un enérgico desarrollo del pozo.

### 2.2.4. FALLAS EN LA COLOCACIÓN DEL ADEME

Los problemas comunes de colocación de ademes derivan de defectos de soldadura durante el ademado, sean en la unión entre tubos, o lo que es más frecuente, al soldar las "orejas" laterales, donde se cruza la flecha para bajar la tubería soldada a tope.

Otra causa de mala entubación, debida a las condiciones de terrenos inestables, es provocada por derrumbes al interior del pozo durante su ademado, momento en que las condiciones de estabilidad son críticas debido a la falta de circulación de fluidos de perforación. El resultado es que el azolve acumulado en el fondo impide bajar el ademe hasta la profundidad proyectada, con el siguiente desfasamiento entre los tramos de cedazo y los estratos del acuífero, resultando un pozo menos productor y en ocasiones productor de finos. Esta situación se puede evitar si se elimina la inadecuada, pero frecuente, práctica constructiva de colar el tapón en la superficie, en una porción de ademe que constituye la punta del mismo, puesto que si la tubería baja abierta en su parte inferior, se cuenta con la opción de desazolvar lo necesario

para permitir bajar el ademe, hasta la profundidad del proyecto.

Si se dejan tubos mal soldados o con "orejas" abiertas, es típica la entrada de filtro granular al interior del pozo y posteriormente el arrastre de finos al quedar la formación geológica en contacto con el cedazo.

Cuando el problema se origina por un desfasamiento en la posición del cedazo, se pueden tener diferentes manifestaciones del ademado incorrecto, las más frecuentes de las cuales son: pozos productores de sólidos o capacidades específicas menores que las normales en la zona.

Los defectos en el ademado del pozo se pueden detectar con facilidad mediante un registro de vídeo (ver Ilustración 2.4).

Ilustración 2.4 Ademe de un pozo



En la situación del desfasamiento del cedazo, la producción de finos se puede evitar, en algunos casos, con soluciones similares a las expuestas en el inciso 2.1.5.

Si el problema resultante es la baja producción por haber quedado parcialmente tapado con ademe ciego algún acuífero importante, no existe ningún remedio práctico a este problema.

#### 2.2.5. FALTA DE VERTICALIDAD DEL POZO

La falta de verticalidad de un pozo puede afectar la operación de la bomba, sobre todo si ésta es de motor en la superficie, pues el sistema de transmisión de flecha está diseñado para trabajar suspendida verticalmente. Si el pozo está inclinado, de modo que la columna de la bomba apoye en

el ademe, éste carga el peso de la flecha en forma irregular sobre los centradores, lo que provoca frecuentes rupturas de flechas y acortándose la vida útil del equipo de bombeo, además, se tienen vibraciones indeseables en la bomba y en el ademe que afectan a los dos. Por todo lo anterior, el aspecto de la verticalidad es particularmente crítico en la cámara de bombeo.

Conviene considerar que aun cuando un pozo se encuentra dentro de tolerancia, pueden presentarse los inconvenientes antes mencionados, pues no solo importa la magnitud de la desviación, sino la dirección de ésta, pues la situación más crítica se presenta cuando cambios bruscos de dirección del pozo flexionan el tubo de la bomba y por consiguiente la flecha.

Abajo de la cámara de bombeo, la desviación del pozo pierde importancia, salvo la posibilidad de que el ademe quede en contacto con el terreno, impidiendo el cubrimiento total del cedazo por el filtro granular.

La falta de verticalidad puede dificultar e incluso imposibilitar la instalación de la bomba en el pozo y cuando éste se trabaja con bomba de flecha se presentan frecuentes problemas en ésta y sus soportes internos.

La falta de verticalidad del pozo se detecta durante la perforación, sea mediante inclinómetros, o por la experiencia del perforista, el defecto puede ser corregido, pero una vez terminado el pozo y colocado el ademe, no existe solución a este problema, que solo puede atenuarse mediante el empleo de una bomba sumergible, que al carecer de flecha es menos susceptible a la inclinación, si bien lo es más al manejo de sólidos, puesto que trabaja a más altas revoluciones.

## 2.2.6. MATERIALES DEFECTUOSOS O INADECUADOS

Evidentemente, la mala calidad de los materiales empleados afectan el funcionamiento del pozo, primordialmente ademe, cedazo, filtro granular y bomba.

## 2.3. DEFECTOS OPERACIONALES

La operación cotidiana de un pozo es tarea sencilla, pero requiere de una observación sistemática y diaria de las condiciones de operación del sistema pozo-bomba. Aun cuando esto se lleve a cabo, la costumbre repetida ocasiona, a veces, negligencia en la verificación, o en el análisis de la información, lo que provoca que los problemas se presenten en forma inesperada, aunque se manifestaran con anterioridad sintonías indicativas de la falla. Resulta de gran importancia la adecuada capacitación del personal de operación, para estar consciente que es parte importante de un complejo sistema, que a su vez es vital para el desarrollo de la comunidad. Los defectos operacionales más frecuentes se presentan a continuación.

### 2.3.1. FALTA DE MANTENIMIENTO DEL POZO

Como se menciona a lo largo de este capítulo, la calidad de un pozo depende de múltiples factores, mismos que establecen la magnitud y frecuencia del mantenimiento, preventivo o correctivo, que requiera. Aun cuando las causas y magnitud de los problemas puedan ser muy variadas, la falta de mantenimiento provoca los siguientes problemas:

- Pozos azolvados, con una disminución de la producción proporcional a los metros de cedazo azolvados
- Disminución de la permeabilidad del acuífero en el entorno del pozo, por colmatación del filtro con materiales finos
- Ademes rotos o colapsados, que pueden provocar la inutilización del pozo
- Ademes corroídos
- Ademes incrustados
- Objetos caídos en el pozo

Para mitigar estos inconvenientes existen las siguientes soluciones:

En general, el mejor medio de corroborar la sospecha que sugieren los indicios anteriores, consiste en la corrida de un registro de vídeo, una vez extraída la bomba.

Si la ineficiencia es causada por pozos azolvados o acuíferos colmatados por materiales finos, la solución, al menos temporal, consiste en desarrollar energéticamente el pozo.

Si el problema se originó por ademes colapsados, se debe eliminar el colapso mediante trompo o prensa electrohidráulica. Si estuviera roto, es necesario el encamisado en la parte afectada o la cementación del tramo.

En el caso de ademes corroídos, la rehabilitación suele ser difícil y depende en gran medida de la intensidad del fenómeno de corrosión, pero algunos casos de pozos corroídos se han continuado operando mediante el encamisado total o parcial, con la correspondiente colocación de filtro granular. Si el ademe se encuentra incrustado, se pueden eliminar las incrustaciones del interior del ademe y de las ranuras del cedazo mediante un cepillado, aunque no alcanza la parte exterior

de él, ni del filtro. Por lo tanto si el cepillado no muestra efectividad, al no mejorar la capacidad específica del pozo, será necesario proceder a un tratamiento químico que elimine la incrustación.

Los objetos caídos al pozo pueden ser extraídos mediante pescantes.

### 2.3.2. FALTA DE MANTENIMIENTO EN LA BOMBA

La bomba, como cualquier equipo electromecánico, requiere de mantenimiento preventivo y correctivo, tema que no es tratado en este trabajo.

### 2.3.3. FALTA DE REPOSICIÓN DE FILTRO GRANULAR

La operación normal de un pozo suele provocar una cierta compactación del filtro granular, por efectos de carga del terreno circundante y su propio peso.

Un pozo productor de sólidos puede originar oquedades que lleguen a ocasionar asentamientos del terreno. En casos más discretos, estos vacíos dejados por el material extraído se van rellenando con el filtro granular del pozo.

Esto se puede observar durante la operación del pozo, cuando ocurre un descenso del filtro granular en el espacio anular; su solución es la reposición desde la superficie, de tal modo que el espacio anular se mantenga siempre lleno de filtro.

### 2.3.4. ARRANQUES Y PAROS FRECUENTES DEL EQUIPO

La operación de un pozo es más eficiente cuanto mayor sean los periodos de explotación continua, pues se obtienen las siguientes ventajas:

- Reducir el consumo de energía en los arranques
- Reducir el desgaste del equipo
- Eliminar agitaciones innecesarias en el pozo en cada arranque

Evidentemente, los frecuentes paros y arranques del equipo provocan efectos contrarios.

## 2.4. CAUSAS REGIONALES

En muchas ocasiones los problemas de funcionamiento de un pozo no son originados por ninguna de las causas anteriores, sino por condiciones regionales generalmente naturales, aunque algunos también pueden ser originados por el hombre, en forma independiente a las características de la obra, como por ejemplo: los abatimientos regionales de niveles estáticos, provocados por sobrebombeo; algunos de estos problemas son:

### 2.4.1. AGUAS CORROSIVAS

El proceso de la corrosión implica el deterioro de ademes metálicos y bombas, con su paulatina desintegración. En el caso del cedazo, se agrandan las ranuras, permitiendo la entrada del filtro granular y luego la del material del acuífero al pozo.

Este problema se manifiesta por una producción de sólidos más o menos repentina, que se inicia cuando el filtro granular empieza a entrar al pozo. Esta situación va acompañada por un descenso brusco de la capacidad específica, debido al azolve acumulado en el pozo, y si éste alcanza el nivel de la bomba, puede atascarse, con los consiguientes problemas electromecánicos.

Un registro de video posterior al cepillado del pozo, muestra con claridad el efecto de la corrosión, que agranda las ranuras del cedazo.

Cuando un pozo es atacado por la corrosión no es susceptible de ser rehabilitado, quedando como única opción la colocación de un nuevo ademe interior, de ser posible de P.V.C., con el filtro granular correspondiente. Esta alternativa sólo es factible cuando el diámetro del pozo lo permite.

### 2.4.2. AGUAS INCRUSTANTES

La incrustación consiste en la precipitación de iones disueltos por las aguas, sobre la parte metálica del pozo que está en contacto con ellas. Los más frecuentes son el carbonato de calcio y minerales de hierro y manganeso. Estos depósitos pueden obturar cedazo, filtro granular y el acuífero cercano al pozo. Este problema se manifiesta por una disminución de la capacidad específica del pozo, provocada por la obturación de la rejilla.

La obturación de las ranuras del cedazo se puede observar con claridad en un registro de video. En la práctica se ha observado que las incrustaciones en la porción exterior del ademe, frecuentemente son más importantes a las observables en el interior.

En ocasiones, el problema se puede atenuar mediante el cepillado del ademe, con lo que se eliminan las incrustaciones de la parte interior del mismo, pero sin lograr afectar los depósitos de la parte exterior. Para atacar los depósitos más profundos, es efectivo el tratamiento con ácido, que disuelva el depósito, aunque ataca también el ademe metálico, si no se dosifica adecuadamente.

### 2.4.3. BACTERIAS FERRUGINOSAS

Existen bacterias, no perjudiciales a la salud, que requieren de la presencia del hierro y manganeso para su ciclo vital. Son conocidas como bacterias ferruginosas o bacterias del hierro y aparentemente oxidan y precipitan el hierro y manganeso disueltos en el agua. Los minerales, junto con los organismos, forman una masa gelatinosa que obstruye cedazo y porosidad del acuífero inmediato al pozo.

Parece evidente que las bacterias no existen en el acuífero antes de que se construya el pozo, ya que viven del hierro del ademe, por consiguiente, se supone que la bacteria llega al pozo durante su construcción o poco después, sea en el fluido de perforación o en herramientas contaminadas. Este problema se manifiesta por una disminución de la capacidad específica del pozo, provocada por la obturación de la rejilla.

Las bacterias ferruginosas a veces son visibles en registros de vídeo, donde las colonias bacterianas se observan como una masa filamentosa. También pueden manifestarse en el equipo de bombeo o en las tuberías surtidas por el pozo.

Como tantos otros inconvenientes, lo más aconsejable es evitar la presencia de las bacterias en el pozo, mediante medidas preventivas, como el utilizar agua potable o clorar la que se va a usar en el fluido de perforación y lavando con periodicidad la herramienta de perforación, con una solución de permanganato de potasio. Igualmente, toda herramienta o equipo que se introduzca

al pozo en las distintas operaciones de mantenimiento, deberá ser desinfectada en una solución de permanganato de potasio o de cloro.

Para corregir el problema, una vez que se ha presentado, hay que aplicar un tratamiento al pozo a base de ácido clorhídrico o ácido sulfámico, o algún producto comercial que disuelva el Fe y Mn precipitados y posteriormente se aplica cloro para matar a los organismos o algún bactericida comercial de eficacia probada. Estos tratamientos proporcionan una solución, generalmente de carácter temporal, pues después de un lapso de tiempo variable, el fenómeno se repite y el pozo requerirá de un nuevo tratamiento.

### 2.4.4. ABATIMIENTOS REGIONALES DE LOS NIVELES FREÁTICOS

La sobreexplotación regional de un acuífero implica descensos paulatinos del nivel freático.

El problema se presenta en una disminución del espesor saturado del acuífero y en consecuencia del caudal explotable, hasta llegar a la situación extrema de que el pozo quede completamente seco ("pozo colgado").

La única solución a esta situación consiste en regular la explotación regional, hasta permitir la recuperación parcial o total de los niveles. En el caso particular de un pozo incompleto, se puede profundizar, con lo que se prolonga su vida útil.

***La normatividad mencionada en este capítulo está referida para el año 2014.***





# 3

## OPERACIONES Y MÉTODOS DE REHABILITACIÓN DE POZOS

Se le llama rehabilitación de pozos al conjunto de operaciones tendientes a mejorar la eficiencia de producción en un pozo que, por determinadas circunstancias, ha salido de esta condición.

Las operaciones y métodos de rehabilitación de pozos son tan variados como puedan ser las condiciones geohidrológicas, de proyecto, constructivas y de operación de la obra, por lo que no resulta práctico el pretender abarcarlas todas. Por tanto, pretender establecer especificaciones precisas de las actividades de rehabilitación resulta prácticamente imposible, pues en cada caso en particular se deberán programar las acciones a realizar, que son adecuadas a esa situación y en ocasiones, incluso ideadas para un caso en particular, por consiguiente, la relación que sigue se debe considerar como enunciativa, pero nunca limitativa.

A continuación se enuncian puntos para la decisión de mantenimiento de un pozo y alargar la eficiencia:

1. Disminución de Caudal
2. Aumento del Abatimiento
3. Cambios en la Eficiencia de la Bomba
4. Cavitación o Vibración de la Bomba
5. Calentamiento del Motor

6. Descenso del Nivel Estático
7. Flujo de Arena
8. Cambio de Color o Enturbiamiento del Agua
9. Contaminación

Por lo cual se requiere de verificar los ciclos de operación con chequeos periódicos.

Con los resultados del monitoreo del pozo se decidirá cuáles son los procedimientos más convenientes para llevar a cabo en la rehabilitación de un pozo.

Los trabajos deben incluir la revisión y el mantenimiento de todos los componentes del sistema de bombeo:

1. El pozo profundo, la tubería ciega y los filtros
2. El equipo de bombeo y la tubería de descarga
3. La acometida eléctrica del sistema, tableros, cables y elementos de control eléctrico
4. La descontaminación o desinfección del agua

### 3.1. ADEMES ROTOS, COLAPSADOS O MAL SOLDADOS

Se entiende por ademe colapsado, aquel que presenta una deformación de su sección circular original, pero sin llegar a la rotura.

La presencia de ademes en mal estado es común en pozos viejos. Las causas más frecuentes del defecto son:

- a) Aguas corrosivas que adelgazan paulatinamente el ademe, o agrandan las ranuras del cedazo. Esta gradual debilitación puede culminar en el colapso o la rotura del ademe
- b) Ademes de mala calidad
- c) Soldaduras defectuosas en las uniones entre tubos, o lo que es más frecuente, en las "orejas" que se abren en los tubos para atravesar la flecha que sostiene la tubería al bajarla durante la operación del ademado del pozo. Esta indeseable situación se soluciona si se usa tubería con rosca y cople, en lugar de la usual soldada a tope
- d) El terreno presiona el ademe en tal forma que puede llegar a colapsarlo. La presión puede ser gradual y creciente o súbita, como se ha manifestado en algunas zonas sísmicas, como el Valle de México, donde el sismo de 1985 seccionó o colapsó varios pozos

Generalmente es posible restituir el diámetro original de un ademe de acero mediante el empleo del "trompo". La operación de trompear un pozo implica disponer de una máquina de percusión, con una sarta de perforación pesada que le imprima energía a la pesada herramienta de acero sólido, que a base de golpes continuos res-

tituya la geometría del ademe. El trompeo se inicia con una herramienta del diámetro inmediato superior al que queda libre en la zona colapsada y se irá cambiando a medida que va aumentando el diámetro abierto, conforme el colapso va cediendo, hasta llegar a su forma original.

Actualmente existe un equipo opcional, la "prensa electrohidráulica", con la que se obtiene un efecto similar al provocado por el trompo, consiste básicamente en un gato de gran capacidad, que se introduce hasta la zona de colapso, donde se expande para restituir la forma del ademe. La ventaja de este sistema estriba en la rapidez de operación con respecto al trompo, pero en cambio, su costo horario es bastante mayor, por lo que no siempre es la mejor solución. El mismo equipo se emplea para colocar forros metálicos a presión que obturen la rotura.

Estas camisas están formadas por lámina delgada; y es conveniente considerar que si el origen del problema son aguas corrosivas o derrumbes de la formación, pueden ser de vida bastante efímera.

Muchos ademes colapsados llegan a romperse y cuando la rotura alcanza un cierto tamaño, se manifiesta por la presencia de filtro granular en el interior del pozo y gran abundancia de azolve. En estas condiciones, la etapa correctiva preliminar consiste, también, en restituir el diámetro original a todo el pozo.

#### 3.1.1. REPARACIÓN DE ADEMES COLAPSADOS

En el caso de ademes colapsados o desgarrados, la rehabilitación comienza por la corrida de calibreadores de varios diámetros, para establecer cuál es el mayor que deja pasar el colapso o rotura.

Una vez establecida la magnitud del colapso, es necesario restituir el diámetro original al ademe del pozo mediante la corrida de trompos de diámetros crecientes (Ilustración 3.1) o mediante la prensa electrohidráulica.

Si el defecto del pozo consiste sólo en colapso de la tubería, con la restitución del diámetro, el trabajo se habrá terminado.

### 3.1.2. REPARACIÓN DE ADEMES ROTOS

En caso de que el ademe esté desgarrado, una unión de tubos mal soldada o una oreja destapada, es necesario tapar la rotura. Si la zona afectada no es muy extensa, la solución más rápida consiste en la colocación de una camisa con la prensa electrohidráulica, pero si no se cuenta

con una, o la zona de rotura fuera grande, se puede cementar, para lo cual se procede a colocar un tapón perforable alrededor de un metro abajo de la zona de la rotura. Si la rotura es cerca del fondo del pozo, resulta práctico azolvar el pozo hasta la rotura y sobre ese azolve colocar el cemento, estas son las recomendaciones más usadas por proveedor y el equipo utilizado puede ser la prensa hidráulica o el trompeo.

- Cubicar el volumen de cemento necesario para llenar el pozo por lo menos un metro arriba de la parte superior de la rotura
- Colocar el volumen de lechada que resulte de la cubicada, con un acelerante de fraguado
- Esperar unas horas y sondear la cima del tapón, que por lo general se encuen-

Ilustración 3.1 Trompo para rectificación de ademes



tra abajo de la cota teórica, debido a la penetración de la lechada en la formación. Incluso puede darse el caso de que el cemento se haya perdido totalmente, lo que obliga a repetir la operación de cementado con lechadas más espesas o incluso un concreto con agregados finos

- De una u otra manera se obtura la zona problemática, se espera hasta el fraguado total y se procede a perforar el tapón con la mayor broca que entre en el ademe reparado

## 3.2. CEMENTACIONES

La cementación es una operación rutinaria en la construcción y también es común en la rehabilitación de pozos.

### 3.2.1. TAPONES DE FONDO

El tapón de fondo evita el "flujo de fondo" en los pozos, con la entrada de las aguas de menor calidad, que frecuentemente existen en la parte inferior de los acuíferos, además de la posibilidad de subpresiones en el pozo. Por consiguiente, es parte de cualquier pozo correctamente construido, pero por negligencia o ignorancia del constructor y supervisión, es común encontrar pozos ya en operación que carece de él, por lo que se puede considerar como una operación de rehabilitación. Por otra parte, puede suceder que exista una rotura en el ademe, lo suficientemente cercana al fondo del pozo como para indicar la conveniencia de extender el tapón de fondo hasta tapar dicha rotura.

Cuando se cuente con una perforadora rotaría, equipo poco usual en la rehabilitación de pozos, el medio de colocación de un tapón de fondo es la tubería de perforación franca. Si se trabaja con

máquinas de percusión el tapón se coloca con una cuchara de dardo. En cualquiera de los dos casos la tarea inicial consiste en la ubicación de la lechada necesaria para el tapón. Cuando se coloque con pulseta, se debe cubicar también la capacidad de la cuchara y establecer cuantas cucharadas se requieren para alcanzar el volumen deseado.

Si el tapón se desplaza por la tubería de perforación rotaria, se debe cubicar el interior de la misma y este volumen, como mínimo, se inyecta de agua, después del cemento, para poder desplazarlo hasta el lugar deseado, asegurando, al terminar, la limpieza de la tubería de perforación empleada para la maniobra.

### 3.2.2. CEMENTACIONES INTERMEDIAS

Cuando se tienen roturas de tubería en zonas amplias o si se requiere clausurar alguna zona indebidamente abierta, por donde penetran al pozo materiales finos, puede resultar más conveniente, desde el punto de vista técnico o económico, una cementación que la colocación de una camisa interior.

La operación de colocación es similar a la que se acaba de describir, pero previamente a la cementación es necesario colocar un tapón perforable que contenga el cemento durante su fraguado. Existen tapones perforables de diversos tipos que se emplean cotidianamente en la industria petrolera, pero su elevado costo y requerimientos técnicos, que generalmente no están al alcance del rehabilitador de pozos de agua, los toman inusuales, por lo que en general se utilizan tapones habilitados en campo. Un tipo de tapón que suele dar buen resultado es el de madera, ajustado al diámetro interior del ademe y lo suficientemente

grueso para impedir que gire en él. Este tapón se baja suspendido con alambres o cable delgado, empujándolo con la herramienta de perforación.

Una vez colocado el tapón de cemento y después de esperar su fraguado, se verifica la posición del techo de la cementación. Aun cuando el volumen de cemento se cubique correctamente, es posible que éste se encuentre más abajo de lo esperado, sea por mala construcción del tapón de madera que dejó escapar parte del cemento, o porque el cemento, pasando a través de la rotura del ademe, rellenó huecos más o menos grandes en el exterior del pozo. Si esto ocurre puede ser necesario repetir la cementación una o más veces, después de cubicar nuevamente el volumen faltante. En estas nuevas cementaciones ya no se requiere tapón, pues la cementación anterior cumple su función.

Fraguado el cemento en la posición deseada, se reperfora junto con el tapón provisional, dejando solo un anillo alrededor del ademe que tapona y consolida la zona problemática.

Se debe considerar la posibilidad de que un tapón de cemento como el descrito forme un anillo alrededor del pozo, que en el futuro impida la reposición de filtro granular abajo de esa cota.

### 3.2.3. COMPOSICIÓN DE LA LECHADA

Se recomienda emplear lechadas de densidad de  $1.8 \text{ gr/cm}^3$ , lo cual se logra con 27 litros de agua por saco de 50 Kg de cemento. Conservando esta misma densidad, la preparación de  $1 \text{ m}^3$  de lechada requiere de 637 litros de agua y 1,169 kg de cemento (aproximadamente 363 litros).

La densidad mínima permisible es de 1.6, equivalente a 42.5 litros de agua por saco de 50 kg de cemento, o bien 730 litros de agua y 869 kg de cemento (aproximadamente 270 litros) para preparar  $1 \text{ m}^3$  de lechada.

En el apéndice A se presentan tablas de proporciones para obtener distintas mezclas de concretos.

Para evitar el agrietamiento de la lechada al endurecerse, se puede agregar a la mezcla un 5 por ciento de bentonita, con respecto al cemento. Esto no es recomendable cuando la lechada se bombea, si no se cuenta con una bomba de buena potencia, pues la adición de la bentonita eleva la viscosidad del fluido.

Para abreviar la espera del fraguado se emplean acelerantes, de los que el cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) es el más usual.

Los tapones, tanto de fondo como intermedios, cuando se colocan con cuchara, pueden construirse con concreto de baja proporción de grava, en lugar de lechada de cemento, lo cual presenta la ventaja de su mayor solidez. Si se trata de un tapón intermedio, esta característica permite que no se fracture con facilidad a la hora de ser perforado. En cambio, tiene el inconveniente de una menor movilidad para rellenar posibles cavidades.

### 3.3. LAVADO Y CEPILLADO DE ADEMES

Para un buen lavado con inyección de agua a presión se debe de utilizar agua limpia inyectada a presión frente a cada uno de los filtros, para

destaparlos, remover los sólidos y reacomodar el empaque de grava como se muestra en la Ilustración 3.2 (Referencias tomadas de manual de mantenimiento de pozos para aguas subterráneas). Ademas incrustados, con costras de oxidación o colonias de bacterias ferruginosas y que se van a desarrollar física o químicamente, requieren de cepillado para limpiarlos en su interior, pues al eliminar con facilidad las costras interiores, total o parcialmente, se aumenta la eficacia del desarrollo.

El cepillo se construye (Ilustración 3.3) con dos placas de acero, que confinan trozos de cable también de acero, cuyas puntas floreadas sobresalen de las placas. Los cables cubren un diámetro igual al del ademe y las placas serán de diámetro menor unos 7.6 cm al interior del ademe a cepillar. Además de estar oprimidos por las placas, los trozos de cable se sueldan a una de las placas, para evitar su caída al pozo durante la enérgica operación del cepillado. La rutina del cepillado es similar a la del pistoneo,

pero el tiempo de operación es generalmente más breve.

### 3.4. PISTONES DE CAUCHO

Son útiles para agitación del agua en el interior del pozo, para remoción de sólidos, y para reajuste del empaque de grava (ver Ilustración 3.4).

### 3.5. REMOCIÓN DE SÓLIDOS CON AIRE COMPRIMIDO

El lavado con inyección de aire comprimido o sifoneo se debe programar de acuerdo con la posición del nivel del agua y con la distribución de los filtros (ver Ilustración 3.5).

### 3.6. SONAR JET

Las microexplosiones (Sonar Jet), es un método que hace algunos años gozó de gran popularidad, pues se presentaba como una nueva moda-

Ilustración 3.2 Lavado de ademes

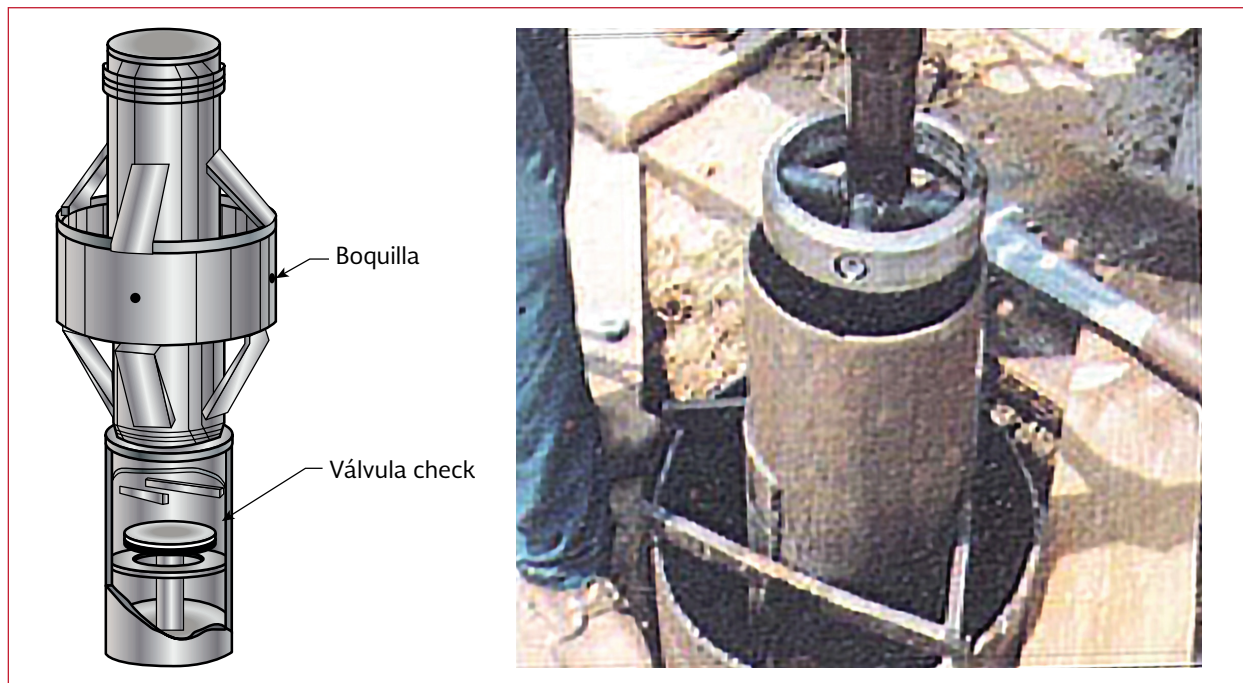


Ilustración 3.3 Cepillos con cerdas intercambiables



lidad para el desarrollo de pozos, aunque nunca se dijera claramente como lograba tal efecto. En numerosas ocasiones se han realizado registros de vídeo antes y después de aplicar el Sonar Jet encontrando que por lo general, elimina solo parcialmente las incrustaciones, en otro caso se realizó un vídeo en el mismo pozo después de cepillarlo, se observó una notable mejoría respecto al Sonar Jet. Adicionalmente, se tiene un costo mucho mayor que para el cepillado, razones que han provocado una disminución rápida de la popularidad del método.

### 3.7. COLOCACIÓN DE FALSOS ADEMES

Se llama falso ademe o "camisa" aquel cuya función reside en soportar parcialmente al terreno solo en ciertos tramos problemáticos, o bien en impedir el paso de sólidos a un pozo que los produce por la razón que fuera.

#### 3.7.1. FALSOS ADEMES EN POZOS CON ADEMES ROTOS

Si el ademe original de un pozo presenta roturas, por lo general debidas a la corrosión, de tal magnitud que no resulta práctico el colocar camisas con la prensa electrohidráulica, la única posibilidad de rescatar el pozo afectado es la colocación de un falso ademe colocado en el interior del dañado. Si el único problema es la rotura y el pozo no es productor de arena, el nuevo ademe puede ser de diámetro inmediato inferior al original y la longitud, como mínimo, llegará desde el fondo del pozo, hasta unos 3 o 4 metros arriba de la parte superior de la zona problemática, pero en pozos poco profundos, puede resultar conveniente prolongarlo hasta la superficie. La proporción y posición de los tramos ciegos y de cedazo, se proyecta con base en la información completa que se recabó en el pozo desde su construcción y si ésta no existe,



Ilustración 3.4 Pistón sólido de caucho

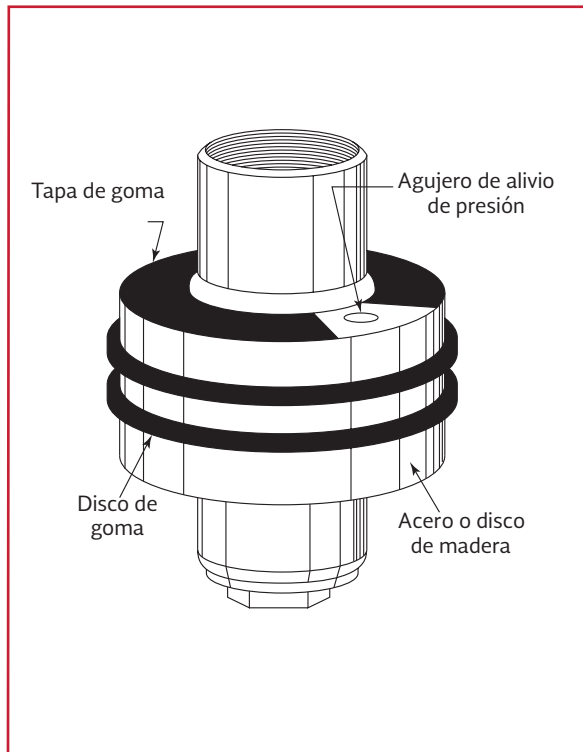
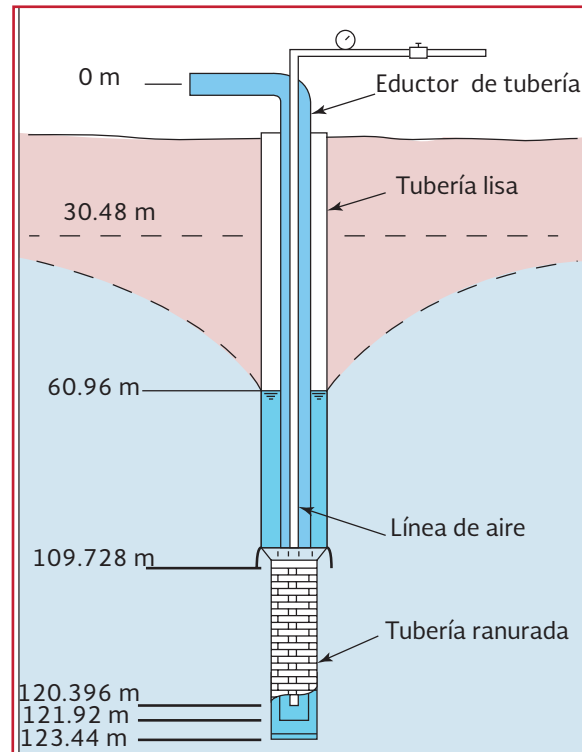


Ilustración 3.5 Nivel para el sistema de lavado con aire comprimido



siempre es recomendable la observación de un registro de video.

### 3.7.2. FALSOS ADEMES EN POZOS PRODUCTORES DE ARENA

La colocación de nuevos ademes en pozos productores de arena requiere, por una parte, de un diseño de filtro granular, cedazo y velocidades de entrada del agua al pozo, similares a los que se realizan para un pozo nuevo, con la diferencia de que la muestra en que se basa el análisis granulométrico proviene de arena producida por el pozo. El diámetro exterior del nuevo ademe es de preferencia de 15.2 cm (6") y como mínimo 10.2 cm (4") menor que el diámetro interior del ademe defectuoso. El ademe a colocar debe estar provisto de centradores que aseguran que el filtro lo cubra perimetralmente. Esta condición es causa de que en muchas ocasiones sea imposible

realizar esta rehabilitación, pues no se cuenta con el diámetro suficiente para dar cabida a la pareja ademe filtro o bien el nuevo ademe es de un diámetro tal que impide la entrada de la bomba. Para eludir esta restricción de diámetro es frecuente que los nuevos ademes se coloquen solo en la porción filtrante del pozo abajo de la cámara de bombeo, lo que se conoce comúnmente como un ademe telescópico.

Como ya se dijo, un falso ademe puede prolongarse hasta la superficie, en cuyo caso su colocación no difiere del ademado de un pozo nuevo o bien dejarse a partir de cierta profundidad, con lo que se abarata la operación y se respeta el diámetro de al menos la sección superior del pozo. En este caso la operación resulta algo más complicada, pues se requiere un dispositivo soltador para dejar en el fondo el falso ademe al llegar a la profundidad deseada. Además, se debe contar con un tapón

cónico que impida la entrada del filtro granular al interior del falso ademe, pero que permita su colocación en el espacio anular entre ambos.

Durante la colocación del filtro granular se debe sondear constantemente el pozo para verificar que no llegue a cubrir el tapón cónico provisional.

### 3.8. COLOCACIÓN DE CAMISAS

Dentro de las opciones que se tienen para reparar pozos colapsados o rotos se encuentra la de la prensa electrohidráulica, con la que es posible colocar camisas interiores que tapen las roturas del ademe.

### 3.9. DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL POZO

Como premisa de cualquier trabajo de rehabilitación, es necesario conocer las condiciones del pozo, para así poder planear las acciones a efectuar. La buena calidad de los registros que se describen a continuación establece el éxito o fracaso de la rehabilitación.

#### 3.9.1. BLOQUES IMPRESORES

En numerosas tareas de rehabilitación, en especial las de pesca, es necesario conocer las condiciones reales en que se encuentra el objeto que causa el problema, para tal fin se emplean frecuentemente los bloques impresores que son herramientas, por lo general construidas en campo, que se unen firmemente a la sarta de perforación, o a una cuchara de dardo y que en la parte inferior constan de un receptáculo que contenga algún material plástico (asfalto, plasti-

lina, jabón, etcétera) que es el que recibe la impresión del objeto desconocido.

#### 3.9.2. CALIBRACIÓN DEL POZO

La sección transversal de un pozo debe ser perfectamente circular a lo largo de toda su profundidad y libre de bordes o cualquier otro tipo de obstáculos que impidan el descenso de la bomba, así mismo, no deben existir codos o cambios bruscos de dirección en el ademe. Con objeto de verificar las condiciones enunciadas se acostumbra correr en los pozos el llamado "registro de calibración", que consiste en pasar a todo lo largo del pozo un "Calibrador" que debe bajar suave y libremente.

El Calibrador se construye con dos o tres tubos del diámetro comercial inmediato inferior al del ademe del pozo que se está probando, lo que resulta en una longitud de 12 metros a 18 metros. Evidentemente es recomendable un calibrador de 18 metros respecto a uno de 12 metros, pero cuando se está trabajando con máquinas pequeñas puede ser imposible el manejo de una tubería de esa longitud. La bajada de la herramienta debe ser suspendida con cable con el objeto de que cualquier obstáculo se pueda detectar con facilidad.

Con el registro de calibración se detectan ademes ovalados, soldaduras de tubos que no coinciden, orejas o roturas que doblen hacia el interior del pozo, así como cambios bruscos en la dirección del pozo (codos).

Si se calibra un pozo de más de un diámetro se requiere de varios calibradores, de modo que si un tamaño determinado no alcanza a bajar a partir de una profundidad, se pueden correr

otros de tamaños inferiores sucesivos, hasta que uno pase.

### 3.9.3. REGISTRO DE VIDEO

El registro de video es una herramienta de la que se dispone desde hace algunos años y que resulta invaluable para conocer el estado real de un pozo, por lo que se debe considerar como un requisito de rutina, previo a cualquier rehabilitación.

Antes de correr un registro de video, es recomendable dejar el pozo en reposo el tiempo necesario para que se depositen los sólidos en suspensión que pudiera haber. Esta clarificación del agua, que permite una imagen nítida, se favorece aplicando al pozo alumbre o hipoclorito de calcio, si bien el efecto de estos productos puede variar notablemente de pozo a pozo.

### 3.9.4. REGISTROS DE VERTICALIDAD

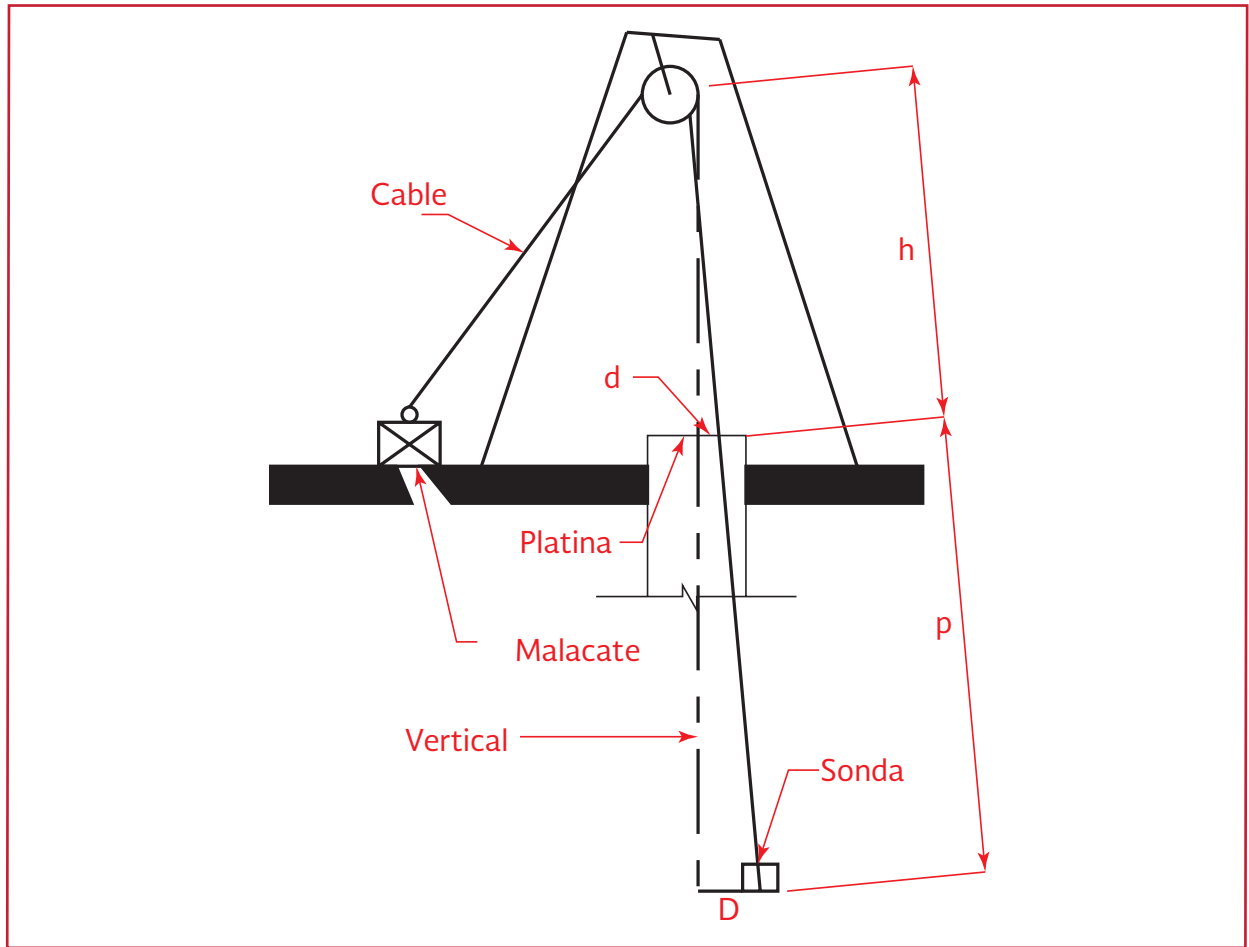
En la construcción de pozos profundos, perforados con maquina rotatoria, se pueden tomar lecturas de inclinaciones de la perforación, con inclinómetros que se corren por el interior de la tubería de perforación y reportan el ángulo que se tiene en el punto medido, pero esta técnica requiere de un equipo sofisticado y caro que no resulta práctico ni económico para el rehabilitador de pozos. La falta de verticalidad de un pozo y lo que es más grave aún, el cambio en su dirección, se manifiesta con mayor intensidad en los pozos equipados con bomba de flecha, que en aquellos que tienen bomba sumergible, pero en cualquiera de los dos casos se tiene el problema del contacto entre la bomba y el ademe,

que puede favorecer la corrosión de alguno de los dos o ambos, además de un cierto desgaste originado por la vibración que pudiera ocasionar la bomba.

El método más usado para medir la verticalidad de un pozo ya terminado se basa en el principio de los triángulos semejantes (Ilustración 3.6). Para su aplicación práctica se forma un triángulo rectángulo cuya hipotenusa es  $h$  y su cateto horizontal es  $d$ , siendo  $h$  la altura desde una platina giratoria o juego de regletas, hasta el eje de la polea, de donde pende la sonda. Al inicio del registro, cuando la sonda se encuentra en la boca del pozo y el equipo bien centrado,  $h$  debe ser totalmente vertical y consecuentemente  $d$ , que es la desviación medida en la platina, es igual a 0. A medida que la sonda va descendiendo a lo largo de un pozo desviado se va generando el cateto  $d$ , cuya magnitud es proporcional a  $D$  en el triángulo cuya hipotenusa es  $(h+p)$  y su cateto horizontal  $D$ . Las lecturas generalmente se toman con intervalos de 3 metros.

El alineamiento se probará bajando por el pozo un dispositivo de por lo menos 3.657 metros (12') de longitud con cinco (5) anillos, cada anillo de una altura de 10 centímetros, todos distribuidos equitativamente en el dispositivo. Los anillos deberán ser perfectamente cilíndricos y sin filos o esquinas que puedan provocar su atascamiento. Su peso es de 50 Kilos aproximadamente. La parte central del dispositivo tendrá que ser suficientemente rígido, para mantener alineados los ejes de los anillos. En caso de usar una simulación de tubería deberá ser una sección de tubería de 12.192 metros (40 pies) de largo o similar (que simule una tubería) del mismo tamaño. El diámetro exterior de la

Ilustración 3.6 Relación de triángulos semejantes en registros de verticalidad



plomada será de 6.35 mm (1/4") menos que el diámetro del revestimiento que está examinando. En caso que la plomada o dispositivo no se mueva libremente a lo largo del revestimiento el alineamiento del pozo tendrá que corregirse.

En la parte superior del pozo se colocará un bastidor o marco para registrar las mediciones con las direcciones Norte, Sur, Este u Oeste. El cable de bajada de la sonda debe ser de acero de 9.525 mm - 12.5 mm (3/8" - 1/2") aproximadamente y en buen estado sin dobleces. (conforme a la norma AWWA 100, en su sección 1-6).

Cálculo de desviación usando la ecuación descrita por Johnson :

$$\frac{h}{d} = \frac{h+p}{D} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$D = \frac{d(h+p)}{h} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

donde:

- $h$  = Altura del eje de la polea de donde cuelga la sonda respecto a la platina en metros
- $d$  = Desviación leída en la platina en metros
- $p$  = Profundidad de la sonda respecto a la platina en metros
- $D$  = Desviación real en metros

El diámetro de la plomada será ligeramente inferior al del pozo. La medición de la desviación "n" puede hacerse fácilmente si en la boca del pozo se coloca una lámina circular de plástico transparente, graduada con círculos concéntricos (por ejemplo de 2 en 2 cm) que se centra perfectamente en el pozo. Esta lámina tiene una ranura para que pueda ponerse y quitarse con el cable metido en el pozo.

En primer lugar se maniobra con la polea-guía de alineación hasta situar el cable en el centro de la boca del pozo. Después sucesivamente se va descendiendo la plomada midiéndose para cada tramo (por ejemplo de 3 metros) las desviaciones "n<sub>i</sub>" que se van produciendo en la boca del pozo. Por medio de la fórmula anterior se calculan las desviaciones "d<sub>i</sub>" a las distintas profundidades y con ellas se puede dibujar un gráfico de desviaciones verticales. Si por medio de un disco graduado (que se orienta al comienzo de las mediciones), se van obteniendo las sucesivas orientaciones de la ranura, se puede dibujar un gráfico de desviaciones en planta.

Aunque el control a lo largo de la perforación es el mejor sistema para evitar desviaciones del sondeo, existen distintos métodos y dispositivos para detectar y cuantificar este problema. Un método sencillo, por ejemplo, consiste en hacer descender, suspendido por el cable de la máquina, un tramo de tubería de varios metros de longitud y diámetro ajustado a la perforación. Pero existen otros métodos como los inclinómetros, aparato de medida formado por una plomada y un disco-brújula graduado según círculos concéntricos con una cámara fotográfica alojada en un cilindro de unos 701 mm de diámetro y 3 metros de longitud. La cámara registrará la posición de la plomada, para distintas profundidades. La serie de fotografías tomadas por la

cámara permite dibujar los dos gráficos anteriormente mencionados, los cuales reflejarán las desviaciones en planta y alzado.

Es frecuente que los pliegos de condiciones técnicas prescriban como prueba de alineación de un pozo, el que pueda pasar por él, un tramo de tubería de 12 metros de longitud y diámetro ligeramente inferior al de la entubación, sin que roce las paredes de ésta.

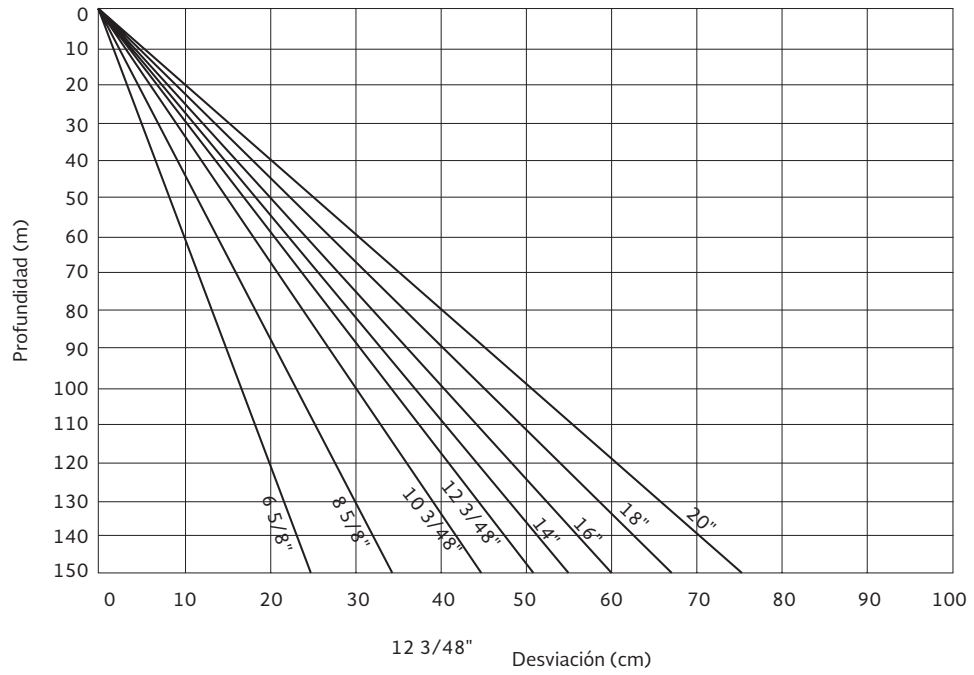
Con el gráfico de desviaciones verticales se puede comprobar si este tramo de prueba pasará o no por el interior de la entubación. Si se inscribe en la curva representativa de las desviaciones un segmento de longitud (a escala) de 12 metros, el tramo pasará libremente siempre que la flecha correspondiente sea menor que la mitad de la diferencia entre los diámetros de la entubación y del tramo de prueba.

#### 3.9.4.1 Límites permitidos en la desviación de pozos

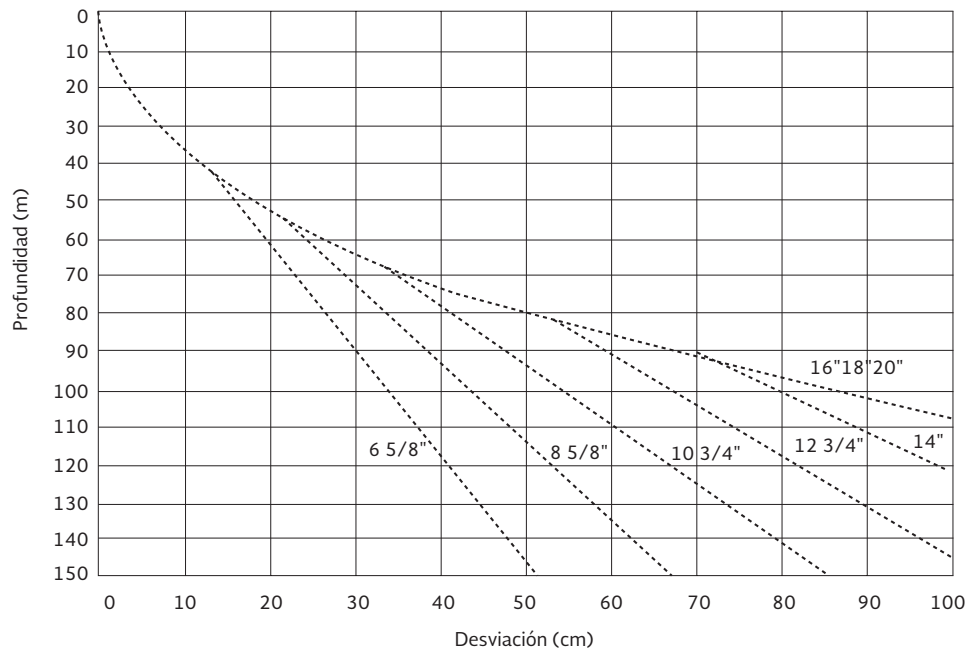
El establecer límites a la desviación de un pozo puede resultar peligroso, pues fácilmente se puede caer en descalificar prácticamente cualquier pozo al que se le realice la medición. Por otra parte, en la mayoría de los casos no importa tanto el ángulo de desviación del pozo en que hacen énfasis las normas, sino la forma que ésta adopte, pues lo que en verdad resulta funesto para una bomba de flecha son los cambios de dirección del pozo (los codos), que obligan a la columna a trabajar arqueada, con rápidos desgastes de las chumaceras y frecuentes roturas.

No obstante, presentamos las dos normas usuales en México (Ilustración 3.7, norma de la antigua Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, adaptada por la Dirección de

Ilustración 3.7 Desviación permitida en pozos de agua

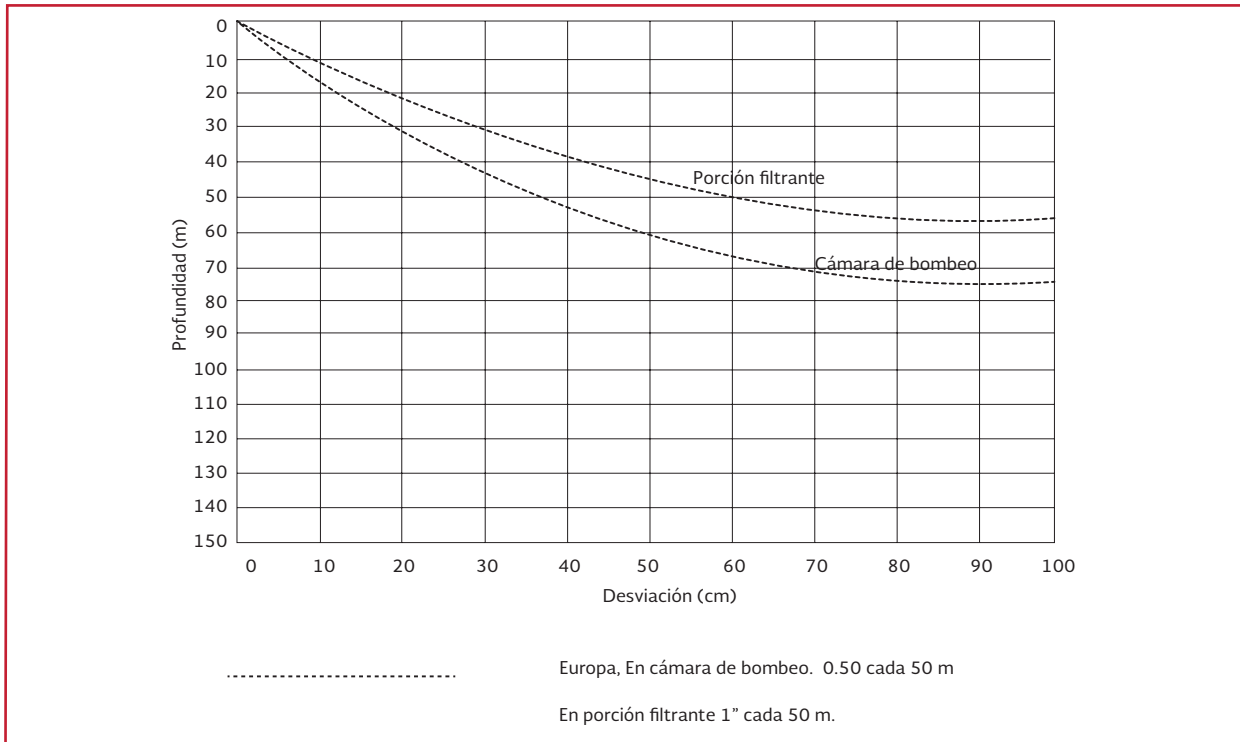


D.D.F. Y SAHOP, Un diámetro cada 100 cm



SARH (GZA) Para cámara de bombeo 2/3 del diámetro del ademe cada 30 cm, sin que rebase 0.5' cada 100 m

Ilustración 3.8 Desviación permitida en pozos de agua



Agua Potable y Alcantarillado del D.D.F.) y una norma utilizada en Europa (Ilustración 3.8), más tolerante, especialmente bajo la cámara de bombeo.

En la cámara de bombeo se permiten desviaciones de hasta un diámetro del ademe ( $Da$ ) cada 100 metros.

$$\text{Desviación lineal permitida} = \frac{\text{profundidad} \times Da}{100}$$

Ecuación 3.3

Se permiten desviaciones en la cámara de bombeo de hasta  $2/3$  del diámetro del ademe por cada 30 metros de profundidad, pero siempre y cuando no rebase  $0.5''$  cada 100 metros de profundidad del pozo (norma de la Dirección de Geohidrología y Zonas Áridas de la Exsecretaría de Recursos Hidráulicos).

$$\text{Desviación permitida} = \frac{2/3 Da}{30 \text{ m}}$$

Ecuación 3.4

$$\frac{\text{Desviación permitida}}{\text{profundidad}} = \frac{0.5''}{100 \text{ m}}$$

Ecuación 3.5

En porción filtrante:  $1''$  cada 50 metros

$$\frac{\text{Desviación permitida en cámara de bombeo}}{\text{profundidad}} = \frac{0.5''}{50 \text{ m}}$$

Ecuación 3.6

$$\frac{\text{Desviación permitida en porción filtrante}}{\text{profundidad}} = \frac{1''}{50 \text{ m}}$$

Ecuación 3.7

*Norma Europea*

En cámara de bombeo: 0.5" cada 50 metros. Ver Ilustración 3.8

### 3.10. INSPECCIÓN DE LA BOMBA DEL POZO

En esta sección se incluyen las acciones periódicas para asegurar la adecuada operación del equipo, así como la relación entre los síntomas principales de un mal funcionamiento y las posibles causas de falla en las bombas, para ayudar al diagnóstico de fallas en estos equipos. Cabe mencionar que las acciones de inspección semestral y anual se realizan con el equipo desarmado.

La inspección semestral debe incluir:

- a) El estopero
- b) La empaquetadura
- c) El prensaestopas
- d) El alineamiento entre el motor y la bomba
- e) El estado de lubricación de los baleros
- f) El estado de la cubierta
- g) Verifique la cimentación y los pernos de sujeción viendo si están apretados
- h) Si la bomba tiene empaque y ha sido dejada sin funcionar, verifique el empaque. Cambie si es necesario
- i) El aceite se debe cambiar por lo menos cada 3 meses (2000 horas) o más frecuentemente si hay condiciones atmosféricas adversas u otras condiciones que puedan contaminar o descomponer el aceite, o si éste es turbio o está contaminado visto por la inspección a través del indicador de nivel
- j) Verifique la alineación y ajuste si se requiere

La inspección anual debe incluir:

Generalmente, debe efectuarse una inspección cuidadosa y completa de la bomba una vez al año. Además de realizar las actividades de mantenimiento semestral, se recomienda:

- a) Desconectar el acoplamiento con el motor y verificar su alineamiento
- b) Revisar y destapar con aire comprimido los drenes, la tubería de agua de sello, la tubería de agua de enfriamiento, así como las venas de la cubierta
- c) Revisar las cubiertas para identificar si existe desgaste excesivo. Una buena práctica es la de limpiar y pintar anualmente las vías de agua de la cubierta
- d) Examinar cuidadosamente en todas sus superficies del impulsor para ver si hay desgaste, la inspección también debe incluir el cubo y el cuñero
- e) Desmontar y revisar la empaquetadura para determinar el grado de desgaste, generalmente deben reempacar los estoperos
- f) Desmontar y revisar las mangas de flecha para determinar el grado de desgaste
- g) Desmontar y revisar cuidadosamente la flecha para ver si hay desgaste o irregularidades, especialmente en todos los ajustes importantes, como los calibres de los cubos del impulsor, debajo del manguito de la flecha y en los cojinetes así como en los cuñeros. La flecha debe inspeccionarse para ver si hay grietas por fatiga, aunque éstas son raras



- h) Desmontar, limpiar y revisar los baleros para determinar la existencia de defectos y su grado de desgaste. Inmediatamente después de la inspección los baleros deben cubrirse con una capa de aceite o grasa para evitar que se empolven o humedezcan. Nunca deje los baleros o la caja de baleros sin este tipo de protección o en lugares inadecuados, las condiciones de almacenamiento y cuidado de las partes, son muy importantes para evitar limpiar nuevamente y garantizar su buen estado al momento de su instalación.
- i) Limpiar adecuadamente las cajas de baleros
- j) El nivel de ruido del conjunto bomba-accionador, debe ser máximo de 85 dB(A) a un metro y medio de distancia, cumpliendo con la NOM-011-STPS

### 3.11. REPARACIÓN DE LA BOMBA DEL POZO

Es frecuente que si existe una bomba en malas condiciones, el encargado de la rehabilitación deberá extraerla del pozo y enviarla a donde el dueño de la obra lo indique o bien encargarse el mismo de la reparación electromecánica. Los procedimientos y recomendaciones para esta tarea se abordan en el libro *Pruebas, puesta en servicio, operación y mantenimiento de equipos y materiales electromecánicos*, del MAPAS.

Después de cualquier reparación a los componentes internos de la bomba deberá probarse nuevamente el equipo al terminar la reparación.

### 3.12. PESCAS

La pesca de herramientas, cables, objetos caídos dentro del pozo e incluso los objetos a pescar es

una labor que requiere de mucho tiempo e ingenio, por ser muy diversos los objetos a pescar. En consecuencia, la mejor recomendación consiste en tratar de evitar las pescas en lo posible, revisando y tomando las debidas precauciones, como el estado del cable, revisión periódica de uniones roscadas, y no exigir a los equipos condiciones de trabajo fuera de especificaciones. Las operaciones de pesca son comúnmente sencillas, inmediatamente después de producirse el pescado, pero cualquier error puede complicarlas e incluso imposibilitarlas, por lo que es preferible no hacer nada antes que proceder en forma inadecuada.

Para realizar la maniobra de pesca, se tienen que conocer las dimensiones y posición de lo que se tiene que pescar; si el objeto ha quedado pegado, centrado, inclinado hacia algún lado, dentro de una cavidad, cubierto de desprendimientos, etc, o si la herramienta u otro objeto tienen deformaciones. Para conocer esto se pueden aplicar varios métodos, como el introducir una cámara de video hasta la profundidad de pesca, o correr un bloque de impresión. Además, en prevención de posibles pescas, el operador del sistema de pozos debe siempre anotar las dimensiones de las diferentes herramientas y objetos introducidos al pozo.

#### 3.12.1. BLOQUE DE IMPRESIÓN

El bloque de impresión es una herramienta que tiene por objetivo obtener una impresión de algún objeto extraño al pozo que se detecte en su interior, sea para identificarlo o bien para establecer su posición.

El bloque impresor es de un diámetro cercano al interior del ademe del pozo y se fabrica a base de un material plástico, soportado por algún dispo-

sitivo. Los materiales plásticos más empleados son la plastilina, el jabón amasado, el plomo, o el chapopote y dependiendo del que se utilice se decide la construcción de la herramienta para que no se desprenda.

Antes de tomar la impresión se debe marcar la profundidad exacta a la que se encuentra el cuerpo problema, de modo que al tomar la impresión, el bloque apenas toque al objeto, de modo que su huella sea nítida y sin deformación. El bloque impresor tiene la ventaja de manifestar la posición del cuerpo dentro del pozo y su forma, aun cuando sólo se tenga una visión en "planta" de él.

Puede decirse con toda seguridad que la obtención de una buena impresión de un "pescado" significa un gran porcentaje del éxito de la pesca.

Cuando se cuenta con una perforadora de percusión, el bloque impresor puede manejarse con la sarta de perforación, o lo que es más recomendable, con la línea de la cuchara.

Si se maneja con una cuchara de dardo, el bloque de impresión se hace con un taco cilíndrico de madera de 1 metro de longitud aproximadamente (Ilustración 3.9 a), y de diámetro de 1 a 2.5 cm inferior al interior de la tubería. Si el ademe está colapsado o con roturas, conviene reducir aún más el diámetro del cilindro. A un extremo del taco se le da forma cónica para igualarlo con el diámetro de la cuchara y, se le practica una ranura para que entre la lengüeta de la válvula de dardo. Es necesario pasar un tornillo que fije el taco a la cuchara.

El extremo inferior se rodea con una chapa fina de unos 20 cm de ancho y de longitud suficiente

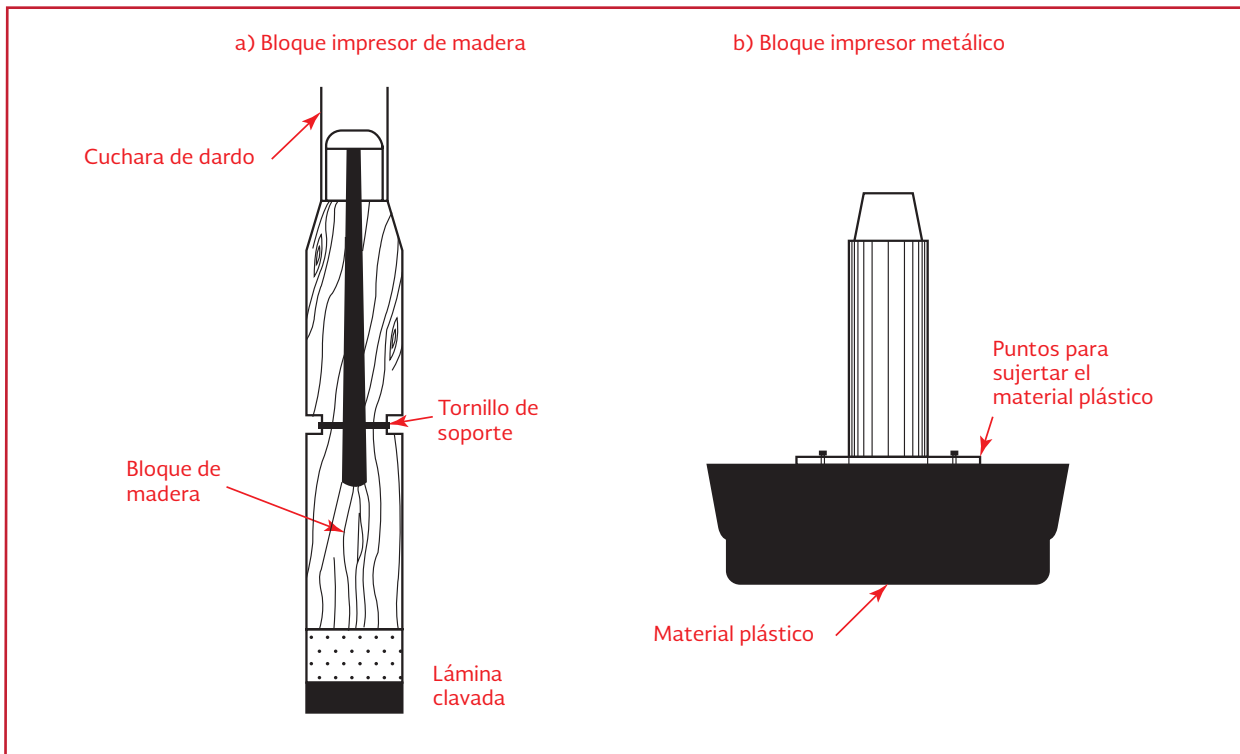
para que lo envuelva por completo. Esta chapa se fija procurando que sobresalga unos 10 cm de su extremo. En el interior de la cavidad se clavan, aproximadamente hasta la mitad, algunas puntas, alambre o rejillas sostenidas al taco para ayudar a mantener dentro de la cavidad la sustancia plástica con que se ha de rellenar y que sirve para sacar la impresión o molde de la herramienta.

Para realizar la impresión se baja la cuchara sin el taco, para determinar la profundidad y se marca el cable exactamente. Se coloca el taco y se baja hasta tener contacto con la herramienta. La marca hecha en el cable indica cuando ocurre esto, desde luego restando la altura del taco. Conviene que la cuchara con el taco se asiente bien sobre el pescado, pero se tiene cuidado de no presionar demasiado. Después se sube el taco despacio y se retira el bloque con el molde deseado.

Si se desea tomar la impresión utilizando la línea de perforar, se debe contar con un sustituto de rosca cónica que se acople al barretón de la sarta. Esta pieza remata en la parte inferior en un disco de diámetro de unos 7.6 cm y mayor que el cuerpo del sustituto, con perforaciones para tornillos con que se fijan los bloques impresores de diferentes diámetros (Ilustración 3.9 b). El modo de operación es similar al tomado con cuchara, pero las maniobras que requiere resultan más lentas y complicadas.

La gran diversidad de objetos a pescar origina a su vez una variedad similar de herramientas de pesca de fabricación de línea, sin que esto excluya que muchas pescas se realicen con pescantes contruidos en campo, y que varían notablemente según el ingenio y la experiencia del perforista.

Ilustración 3.9 Bloques de impresión



### 3.13. PRENSA ELECTROHIDRÁULICA

Es una herramienta que consta de tres gajos que se pueden abrir y cerrar al ser accionados por un pistón al que se le aplica la presión con una bomba hidráulica. Este conjunto es el que se introduce al pozo y recibe la energía necesaria a través de un cable conductor eléctrico, que a su vez recibe la corriente de un generador con motor de combustión interna. Se ejerce una fuerza de hasta 150 toneladas lineales.

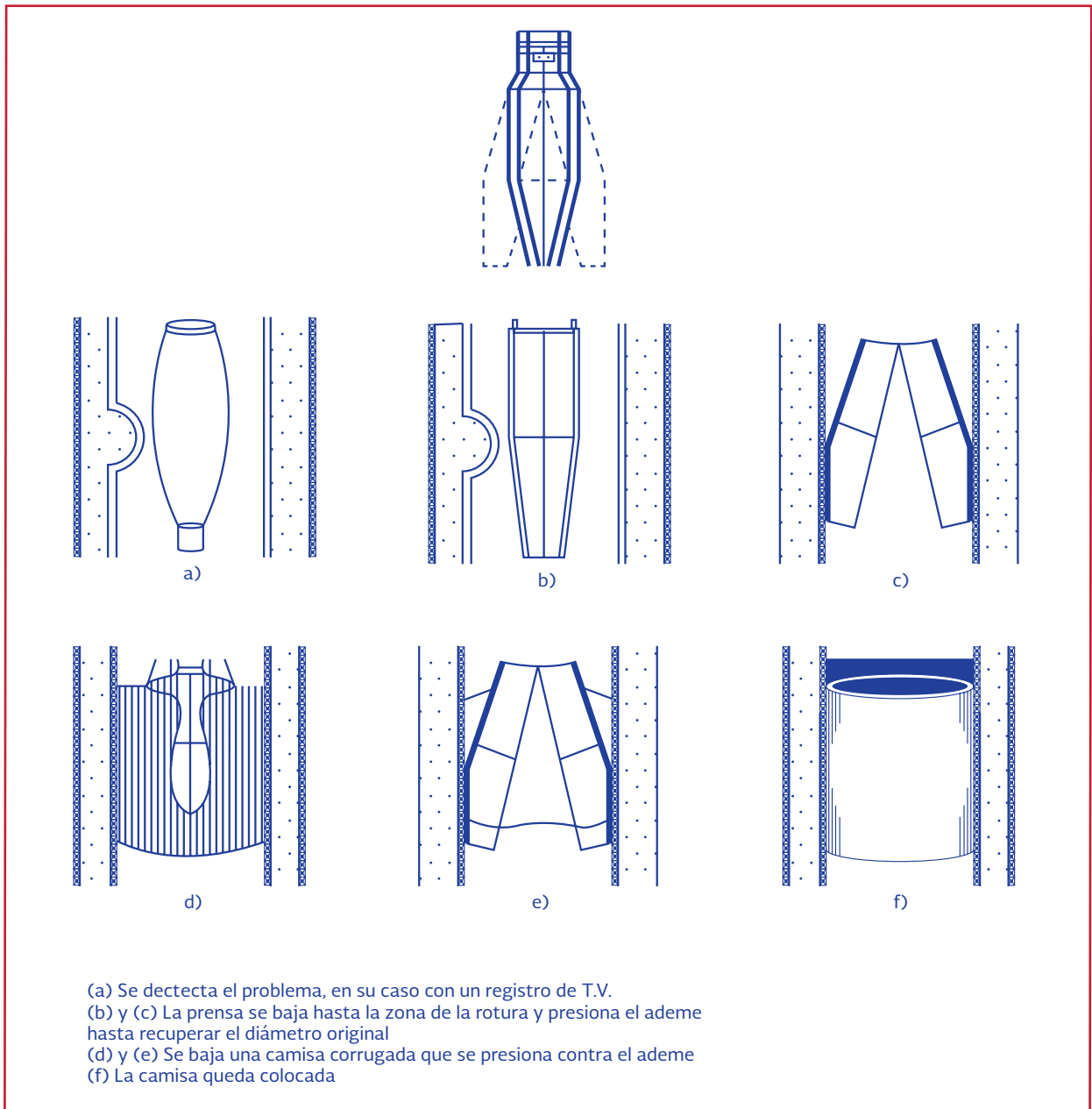
La prensa se baja hasta la profundidad donde se presenta la falla, por medio de flechas de bomba o con cable y es capaz de ejercer presiones suficientes para que las deformaciones o las puntas del ademe roto vuelvan a su posición original, generalmente esto se logra después de repetir la maniobra varias veces. Con estas maniobras se

logra un efecto similar al que se consigue con un trompo.

Una vez que se enderezó el ademe roto o colapsado, se procede a colocar una camisa de lámina (8 mm) cuyo diámetro exterior corresponde al interior del ademe que se pretende reparar. La camisa lleva unas estrías o canales con el fin de disminuir el diámetro durante el descenso de la herramienta y permitir que sea alcanzada la profundidad requerida. Cuando se aplica presión, los canales se planchan y la camisa alcanza su diámetro definitivo (Ilustración 3.10).

Las camisas tienen una longitud aproximada de un metro y conviene soldar, en el perímetro superior e inferior de ellas, cuatro tuercas, que al ser incrustadas en el ademe original, por la presión de la prensa, incrementan la adherencia entre camisa y ademe.

Ilustración 3.10 Prensa electrohidráulica



Para la instalación de una camisa, se monta ésta en la prensa hidráulica cerrada, empleando un cable, que en la primera vez que se accione la prensa se rompe, dejando adherida la camisa al ademe, por medio de las tuercas y la fricción; la prensa se vuelve a accionar hasta dejar completamente adherida la camisa.

### 3.14. PROFUNDIZACIÓN DE POZOS

En ocasiones, debido a la sobreexplotación de un acuífero, los niveles de bombeo descienden y un pozo puede resultar corto e ineficiente para las nuevas condiciones. Si sus característi-

cas geométricas lo permiten, el pozo puede ser perforado por su interior hasta alcanzar las condiciones de explotación actuales. Para que esta operación sea posible se requiere de tres condiciones preliminares:

- Que el pozo tenga un diámetro suficientemente amplio para permitir la reperfusión por su interior y posteriormente el ademe y colocación del filtro cuando la reperfusión se efectúa en materiales no coherentes. Por tanto, si se requiere de filtro granular, el diámetro mínimo necesario para efectuar esta operación será el de 32.39 cm (12 3/4") y si se deja el pozo descubierto en un acuífero en rocas coherentes, de 21.91 cm (8 5/8")
- El pozo a profundizar se debe terminar con tapón de cemento sin modificación del diámetro original del ademe. Nunca con terminación de "punta de lápiz". El ademe original del pozo debe ser de acero, con cedazo de ranura, de tipo canastilla o tipo concha, pues ademes menos resistentes, como el de P.V.C. o el cedazo de alambre helicoidal, difícilmente resisten el roce o incluso golpes de la pesada herramienta de perforación durante las operaciones de reperfusión
- La profundización del pozo se puede realizar con una perforadora de cualquiera de los sistemas usuales, pero excluyendo, el sistema de perforación rotaria directa con lodo bentonítico, ya que contamina la parte superior del pozo ya desarrollada o en su caso se pueden utilizar lodos biodegradables (polímeros) para este sistema

En la reperfusión de un pozo se debe mantener el mismo control litológico y se corren los regis-

tros habituales de un pozo nuevo. Asimismo, el diseño del filtro granular y cedazo es similar.

El ademe que soporta la porción reperfusión del pozo, por lo general no continúa dentro del ademe original, para no limitar el diámetro de la cámara de bombeo, no efectuar un gasto innecesario, ni aumentar las pérdidas de carga al penetrar el agua al pozo; pero como medida de seguridad, la nueva tubería se traslapa al menos unos tres metros dentro de la antigua y se deja en el fondo mediante un dispositivo soltador, variable según el tipo de perforadora empleada en la maniobra.

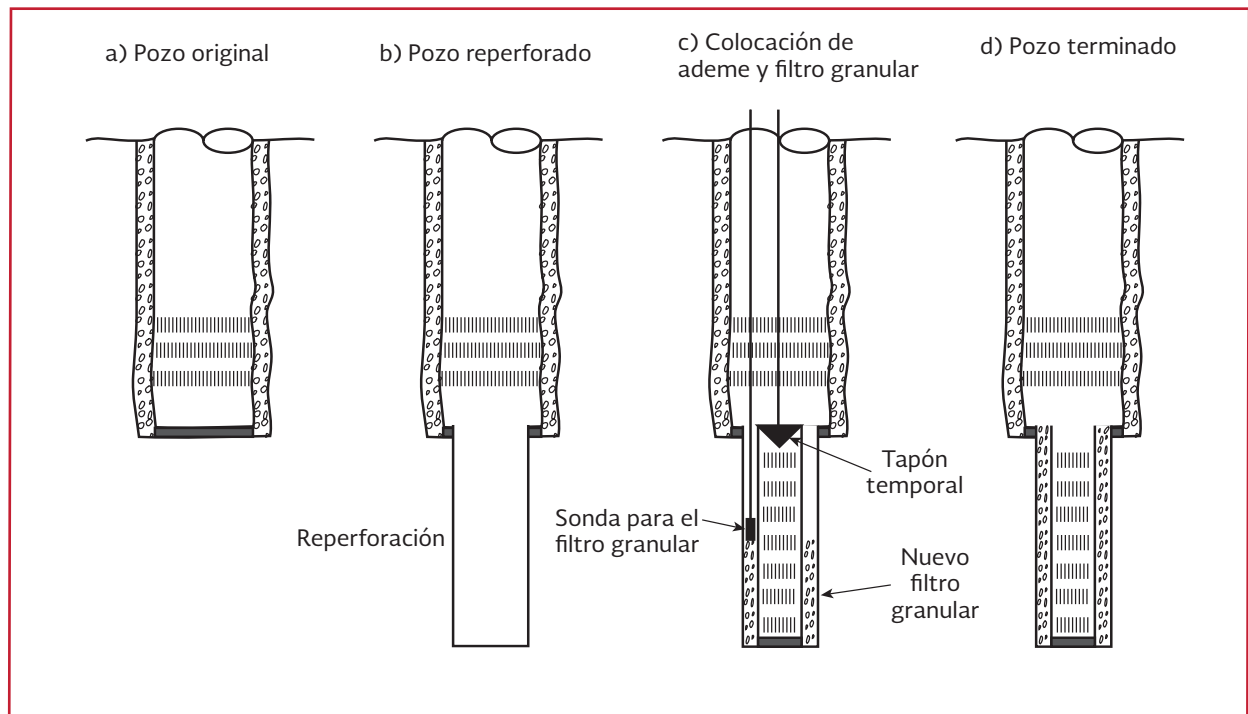
La operación de colocación del filtro granular dentro del tramo reperfusión, una vez soltado el ademe (Ilustración 3.11), se debe realizar de la siguiente forma:

Colocación de un tapón cónico, bajado con cable o tubería, con el vértice hacia abajo, de modo que se introduzca dentro de la boca del nuevo ademe. La base del cono debe ser del mismo diámetro exterior que la tubería que tapona, o lo que es lo mismo, solo 1.25 cm (1/2") mayor que el interior de la tubería.

El filtro granular, previamente cubicado, se vierte desde la superficie; su colocación se debe verificar continuamente mediante una sonda, pues nunca debe sobrepasar la cota de la boca donde se encuentra el tapón. En caso de que se rebase dicha cota, antes de haber tomado al menos el volumen teórico, es indicio de acuñamiento del filtro (puenteo), en cuyo caso se intentará romper el puente agitando el pozo lo más suavemente posible, con alguno de los métodos de desarrollo.

Es frecuente que el pozo tome un volumen de filtro superior al teórico, al rellenar la posible

Ilustración 3.11 Profundización de un pozo



sobreexcavación que se pudo tener durante la perforación, por lo que conviene adquirir un volumen de filtro que exceda en un 20 a 30 por ciento, el volumen teórico, según el material reperforado

Cuando el filtro alcance la cota de la boca del tubo nuevo se suspende el engravado y se extrae el tapón cónico, procediéndose a desarrollar el pozo, como si se tratara de uno nuevo.

Por último, se procede a aforar o se prueba el pozo con su bomba de operación, comparando la nueva capacidad específica con la que se tenía antes de la rehabilitación. Si se encuentra una variación notable en este valor, conviene realizar un aforo formal, que quizás concluya en una nueva selección de bomba.

### 3.15. REPOSICIÓN DEL FILTRO GRANULAR

A medida que un pozo permanece en operación y preferentemente si está mal desarrollado, el filtro granular va sufriendo un cierto reacomodo entre gránulos, que se traduce en un descenso del nivel que se manifiesta en la superficie, hasta que alcanza la mejor compactación. Este descenso es más notorio cuando el pozo es productor de arena, pues el material extraído va dejando huecos que el filtro rellena; consecuentemente en estos casos el descenso del filtro es más acelerado, y permanente. En cambio, cuando un pozo explota acuíferos kársticos o en fracturas, el asentamiento del filtro es leve y sólo ocurre durante el inicio de la operación. Cuando un pozo se desarrolla mecánicamente, dentro de

las maniobras, de rehabilitación, la extracción de finos que se produce ocasiona un notable descenso del nivel del filtro, por descenso es una de las señales determinantes de que el desarrollo se está efectuando eficientemente.

Sea cual sea el motivo del descenso del filtro granular, éste se debe reponer a la brevedad posible, a partir de un volumen de filtro que se debe tener cerca del pozo para estos fines, y por otra parte, el pozo debe contar, desde su construcción, con tubos engravadores para reponer el filtro, sin necesidad de efectuar maniobras complicadas.

En caso de que sea necesario el uso de filtro granular, este debe estar conformado por partículas inertes redondeadas, de origen natural; asimismo, no deberá tener un porcentaje mayor del 5 por ciento de material carbonatado. En ninguno caso se deben utilizar filtros de material triturado (NOM-003-CNA-1996), requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos.

### 3.16. VERIFICACIÓN DE LA REHABILITACIÓN

A lo largo del Capítulo 2 se ha visto que las causas que provocan una rehabilitación de pozo son muy variadas y por tanto también lo son las manifestaciones de las mejoras logradas al rehabilitarlo.

Si la rehabilitación está enfocada a reparar un defecto físico en el pozo, como ademas colapsados o rotos, pescas, etc. evidentemente el éxito de la maniobra se manifiesta en la reparación del daño, y la supervisión a lo más requerirá de

una inspección visual del pozo con un registro de vídeo.

Si la rehabilitación se originó por una baja de eficiencia, provocada por incrustación, azolve, bloqueo de acuífero y filtro por finos, o problemas regionales, la verificación de los resultados de las maniobras de rehabilitación se mide por medio de un aforo. Este aforo normalmente es más corto que el realizado en un pozo nuevo (de 24 a 48 h), pues ya se tienen antecedentes de las características del pozo. Los resultados se comparan con los datos de operación previos a la rehabilitación.

Se debe hacer énfasis que el éxito de la rehabilitación no se calibra en función al incremento en el caudal, sino en el de su eficiencia (Ver Capítulo 1), o como mínimo, cuando el pozo no se vuelve a aforar, en su capacidad específica para un caudal o un nivel determinado, lo que se manifiesta como distintas combinaciones de caudal nivel dinámico en alguna de las condiciones siguientes:

- Mismo caudal que antes de la rehabilitación pero menor nivel dinámico
- Mayor caudal para un mismo nivel dinámico
- Mejoran las dos condiciones anteriores
- Una condición mejora y la otra empeora pero de tal modo que la relación beneficio costo oportunidad resulta positiva

Cuando se corre el registro de vídeo preliminar a la rehabilitación, suele resultar incompleto, pues no es posible bajar la cámara hasta el extremo del pozo, por impedirlo algún obstáculo ("pescado" o azolve), por lo que es conveniente correr un nuevo registro para completar la información

y comprobar los resultados de la rehabilitación (cementaciones, cepillado, etcétera).

Para los pozos destinados a los usos públicos urbanos, así como para aquellos destinados a usos agroindustrial e industrial que procesen alimentos, será obligatoria la desinfección del pozo (ver la

norma NOM-003-CNA-1996, requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos).

***La normatividad mencionada en este capítulo está referida para el año 2014.***





# 4

## INCRUSTACIÓN Y CORROSIÓN DE POZOS

La mayor parte de la pérdida dentro de un pozo bien construido, viene dado por dos efectos: la corrosión y la incrustación. La composición del agua en general es de naturaleza corrosiva o incrustante.

La variedad de las causas que los provoca ocasiona que la prevención sea muy difícil, algunas aleaciones son más resistentes a cierto tipo de corrosión o incrustación pero no a otras. Para seleccionar un material óptimo, se necesita realizar un estudio químico de las aguas y definir el material de la tubería de bombeo y del ademe, pero aunque se logre esto, no se tiene en el mercado la variedad de ademes para conseguir el necesario, por lo que en general, dado que la prevención no es factible, se debe realizar un seguimiento cuidadoso, observando los efectos del fenómeno en el pozo, y aplicando un método para desincrustación o anticorrosión a tiempo, sin dejar que éste llegue a alcanzar niveles que imposibiliten la rehabilitación del pozo.

La condición incrustante o corrosiva de un agua subterránea depende, en buena medida, de su composición química. Existen dos índices, el de Riznar ( $I_R$ ) y el de Langelier ( $I_L$ ), que proporcionan una medida cuantitativa de la tendencia del agua a depositar o disolver materiales.

### 4.1. INCRUSTACIÓN

La incrustación es una acumulación de materiales extraños en las partes metálicas del pozo y alrededor de él, en el filtro granular o en el acuífero. Su consistencia puede ser frágil, dura, como una masa cristalina, gelatinosa, suave o pastosa, según sea la causa de la incrustación.

Ilustración 4.1 incrustación en pozo (Nitana 200, 2008)



La incrustación ocasiona una disminución del caudal específico, pues ataca principalmente a las zonas filtrantes, reduciendo la entrada del agua y en casos extremos llega a taparla por completo. La reducción del área libre del cedazo incrementa la velocidad de entrada del agua al pozo, provocando un arrastre de sólidos finos.

También en el acuífero, alrededor del ademe, se puede presentar una incrustación que rellena los poros y disminuye la permeabilidad en una zona más o menos grande. Dentro del pozo, puede darse el caso de que la incrustación reduzca la sección interior del ademe e incremente la exterior de la bomba, lo que llega a provocar la imposibilidad de extraerla.

Las incrustaciones pueden afectar a:

- La zona filtrante de los pozos. Como consecuencia producen una reduciendo de la superficie efectiva de entrada de agua
- El propio acuífero. Rellenan sus poros y disminuyen su permeabilidad
- Tuberías. Disminuyen la sección. Si se producen sobre la propia pared del pozo, en principio no afectan a la explotación del mismo (pueden molestar o impedir el montaje y desmontaje de la bomba), pero si lo hacen en la tubería de impulsión, aumentan las pérdidas de carga del bombeo

En un pozo que bombea a un ritmo de 100 m<sup>3</sup>/h, la disminución de la dureza del agua en sólo una parte por millón debido al paso por la rejilla, supone la precipitación de 2.4 kg diarios de carbonato cálcico. Afortunadamente, solo parte de ese carbonato se precipita sobre la rejilla, pero una parte considerable puede hacerlo en zonas próximas o en el sistema de bombeo. Las incrustaciones pueden llegar a colmatar totalmente la rejilla en sus inmediaciones, hasta algunos centímetros de espesor, y parcialmente hasta varios decímetros.

#### 4.1.1. TIPOS DE INCRUSTACIÓN DE ORIGEN NATURAL

Los tipos de incrustación, en su orden de frecuencia, son:

##### 4.1.1.1 Incrustación debida a la precipitación de carbonatos o sulfatos de calcio y de magnesio

Es frecuente que el agua contenga carbonato de calcio o de magnesio disuelto, gracias a la presencia del anhídrido carbónico, que generalmente es abundante en los acuíferos. Al entrar el agua al pozo, experimenta una disminución en las condiciones de presión desde la que estaba sometida en el acuífero hasta la presión atmosférica que actúa en el pozo. El anhídrido carbónico se libera del agua en forma de gas, lo que produce que se sobresature de carbonatos que se precipitan en forma de incrustación en el pozo o su alrededor. Un cambio en la temperatura del agua produce un efecto similar.

Otras incrustaciones menos frecuentes, son las de sulfato de magnesio o las incrustaciones duras de yeso producidas por aguas sulfatadas.

##### 4.1.1.2 Incrustación debida a la precipitación de compuestos de hierro y manganeso, principalmente óxidos hidratados

En la composición del agua es frecuente encontrar cantidades notables de hierro, generalmente asociado a aguas reductoras, este hierro, como los carbonatos, se precipita por la pérdida de anhídrido carbónico, al cambio de tempera-

tura, contacto con el aire o con la variación de la velocidad de entrada del agua; también ocurre lo mismo con el manganeso. Estas precipitaciones pueden obstruir el cedazo o infiltrarse alrededor del pozo, obstruyendo los poros del acuífero.

#### 4.1.1.3 Oclusión debida a materiales gelatinosos, provocados por bacterias ferrosas y otros organismos

Las bacterias de hierro aparecen en pozos abiertos a la atmósfera con suficiente hierro y manganeso, en conjunción con materia orgánica disuelta, bicarbonato o bióxido de carbono.

Los depósitos de bacterias de hierro, en algunas regiones, tapan los pozos por catalización enzimática y oxidación del hierro o manganeso, formando depósitos. La precipitación del hierro y el rápido cultivo de bacterias, crea un voluminoso material que rápidamente cierra las aberturas del filtro y de los sedimentos cercanos.

Otras formas de bacterias del hierro reducen el diámetro interior del ademe bajo condiciones anaeróbicas. Hasta el momento faltan por clasificar muchos tipos de bacterias del hierro que participan en el depósito de este mineral.

Una clasificación de bacterias del hierro, usada en la industria del agua subterránea, se basa en la forma física de los organismos. Este sistema de clasificación ayuda en la identificación del tipo de bacteria que se encuentra en una muestra en particular.

- **Formas capsulares conoides.** Incluye solo un género conocido, el *Siderocapsaceae*. Este organismo se presenta en forma de numerosos corpúsculos redondeados, envueltos en una cápsula

*mucoide*. El depósito que forma la cápsula es óxido férrico hidratado, en forma de un precipitado café rojizo. Este organismo probablemente produce precipitados de hierro que pueden ser rotos mediante el uso de un agente "quelante".

- **Formas ramificadas.** Compuestas por bandas móviles unidas a una rama o tallo. El género de esta forma física es *Gallionella*, también llamada *Spirophylum*. Puede ser reconocida por su movimiento y por la celda bacteriana en forma de frijol al final de la rama móvil. Probablemente ésta sea la principal bacteria enzimática presente en los pozos
- **Formas filamentosas.** Agrupa a cuatro géneros: *Crenothrix*, *Sphaerotilus*, *Clonothrix* y *Leptothrix*

Las especies del género *Crenothrix* tienen un extremo delgado que gradualmente engorda hacia el lado libre. Germinan sin este tejido y unen sus filamentos a través de las paredes, dando la apariencia de numerosas ramas extendidas desde la rama principal.

Los miembros del grupo *Sphaerotilus* presentan filamentos coloreados que aparentan falsas ramas. Otra bacteria ferruginosa que presenta falso rameado es el *Clonothrix*.

El cuarto género del grupo filamentosos es la *Leptothrix*, una forma simple de tejido, usualmente incrustado con hierro a todo lo largo de la superficie, la cual es generalmente uniforme, pero al final es ancha y con celdas cilíndricas coloreadas y acopladas extremo con extremo.

Si en un pozo se sospecha la presencia de bacterias del hierro, se debe obtener muestras con un dispositivo filtrante, acoplado a la descarga de

la bomba del pozo durante una semana. El agua pasa a través del filtro durante este periodo, dejando un depósito café oscuro en la cubierta de porcelana, el cual puede ser analizado por un laboratorio calificado.

Otro método para obtener muestras con facilidad es recolectando el material atrapado en válvulas o líneas de descarga de la bomba, en pozos parados temporalmente o en pequeños objetos metálicos suspendidos en el pozo para este fin. Para lograr observar las bacterias es necesario contar con un microscopio de al menos 1 000 X de aumento.

#### 4.1.1.4 Obstrucción debido a la deposición en la rejilla de materiales limo arcillosos

Limos y arcillas, procedentes del lavado de los acuíferos, se aglutinan con el material incrustante y contribuyen a aumentar la cantidad de incrustación efectiva. Ocurre con frecuencia cuando las aberturas de la rejilla son muy pequeñas, si el pozo ha sido poco desarrollado o cuando el acuífero contiene grandes cantidades de finos.

#### 4.1.2. CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONAMIENTO DE LOS POZOS QUE FAVORECEN LA INCRUSTACIÓN

Algunas veces, las características constructivas del pozo dan origen a la incrustación del mismo. Comúnmente los pozos ineficiente, con notables pérdidas de carga en el paso del agua del acuífero al pozo por la zona filtrante, y los que están mal desarrollados, suelen incrustarse con mayor facilidad que pozos de la misma región bien terminados.

El incremento en la velocidad de entrada del agua, la turbulencia y el descenso excesivo del nivel dinámico, facilitan el desprendimiento del anhídrido carbónico, con la consecuente sobresaturación del agua con carbonatos. Un desarrollo adecuado del pozo limpia de finos las zonas aledañas, facilita el flujo del agua, disminuyendo la velocidad en el medio poroso contiguo al pozo y retarda la incrustación. Por las mismas causas, un pozo completo tiene menos propensión a incrustarse que uno incompleto.

La zona de aireación, en el intervalo entre los niveles estático y dinámico, donde se producen cambios físicos y químicos más intensos, facilita la incrustación de hierro.

El régimen de explotación del pozo favorece la incrustación, si se explota de tal manera que el nivel dinámico descienda hasta las zonas filtrantes, dejándolas en seco. La condición alterna de seco y mojado ayuda a la evaporación del agua que deposita cristales de calcio y precipita el hierro que puedan contener las aguas. Dependiendo de la frecuencia de los arranques y paros de la bomba, este proceso se acelera o retarda.

El caudal de explotación se debe seleccionar para que la velocidad de entrada no sea mayor a 2 o 3 cm/s, y el pozo pueda trabajar en un régimen de baja turbulencia, evitando el desprendimiento del anhídrido carbónico.

#### 4.1.3. PREVENCIÓN DE LA INCRUSTACIÓN Y DESINCRUSTACIÓN

La prevención de la incrustación es muy difícil cuando se dan condiciones naturales que la favorecen, por lo que el pozo afectado por ella se tiene que desincrustar periódicamente; pero el

intervalo de tiempo en que esto se realice puede ampliarse si se siguen las recomendaciones anteriores y se mantiene una observación periódica del pozo, para evitar Regar a incrustaciones extremas.

El empleo de ademes de PVC elimina por completo el problema de incrustación, aunque persista en bomba, filtro y acuífero. Hay que tomar en cuenta que su uso trae consigo otros tipos de problemas, como pueden ser los debidos a sus propiedades mecánicas, su instalación, estructura, etc. Por lo que no siempre es la solución idónea.

No hay evidencias que corroboren la existencia de las bacterias ferruginosas en el acuífero antes de la perforación de pozos, por lo que se presume que su establecimiento y multiplicación se relaciona con las maniobras realizadas en la perforación o rehabilitación; las bacterias contenidas en agua que se utilizó durante la construcción del pozo, suelen ser transportadas desde un pozo contaminado a uno que no lo estaba.

Consecuentemente, el contratista de perforación debe evitar introducir la bacteria del hierro al acuífero durante la construcción o reparación del pozo. Los fluidos que se utilicen durante la perforación deben clorarse con concentraciones de 50 mg/l de cloro activo, siempre y cuando se tenga duda del origen y calidad del agua. Como el cloro no es estable en el fluido de perforación, se debe adicionar periódicamente, manteniendo unos 10 mg/l de cloro residual. La herramienta de perforación se debe desinfectar con cloro o lavarse con permanganato de potasio para eliminar bacterias provenientes de otros pozos. Además, debe efectuarse rutinariamente una limpieza de los tanques o pipas de agua utilizados para suministrar agua al pozo.

La desincrustación de pozos debe efectuarse cuando se empieza a notar una disminución clara del caudal específico, pues si se deja avanzar mucho el fenómeno, el tratamiento puede ser poco eficaz o inútil por completo.

El tipo de tratamiento para desincrustar un pozo depende del tipo de incrustación, cuestión que no siempre es fácil determinar. Los tratamientos más efectivos son los químicos y el agua del pozo debe mantenerse agitada con algún sistema mecánico. Los tratamientos de tipo mecánico no suelen ser efectivos para el tratamiento de incrustación, excepto en el interior del ademe, pero en cambio, después que un pozo ha sido tratado químicamente mejoran los resultados obtenidos.

## 4.2. CORROSIÓN

La corrosión es la destrucción de un metal por reacción química o electro-química debido al medio ambiente. El material corroído es disgregado y puesto en solución.

Ataca preferentemente al cedazo del pozo y logra ampliar las ranuras, que es la porción del ademe que presenta más caras libres al ataque de la corrosión. El resultado de dicho aumento es el paso de elementos indeseables de un tamaño mayor al esperado en el diseño del pozo. Además, debilita la tubería en general, logrando en un momento dado la posibilidad de que se presente un colapso, con la oclusión parcial o total del pozo.

Algunas aguas son muy corrosivas para la mayoría de los metales que pudieran sumergirse en ellas, otras corroen en forma selectiva solo algunos elementos. Además de este factor, relacionado con la composición química del agua,

existen otras causas que propician la corrosión de los metales en el pozo, como son la velocidad de circulación del agua respecto al material agredido, la formación de películas protectoras, la temperatura y la presencia de fenómenos electrolítico.

El oxígeno que se encuentra en la superficie del metal, ya sea en forma de aire o disuelto en el agua, se transforma en un óxido de características diferentes a las del metal original; éste se adhiere al metal y puede formar una superficie sin grietas, reduciendo sus propios efectos o integrarse y romper la estructura interna del metal, formando grietas que se van agrandando y degradando al metal.

#### 4.2.1. PROCESOS ELECTROLÍTICOS

Siempre que se tienen dos metales unidos, o un metal y su óxido, en un medio electrolítico, que es el caso de los pozos cuya agua contiene sales, se genera un fenómeno llamado pila galvánica, la cual, por medio de un proceso químico, tiende a degradar a uno de los metales, al transportar parte de él, en forma de iones, y acumularlo en el otro metal. Al ocurrir este proceso, se desprende oxígeno e hidrógeno, el cual se puede adherir al metal degradado, formando una capa protectora, que retrasa el proceso.

En las zonas de aireación, donde esta capa de hidrógeno es más fácil de eliminar, se dan corrosiones más severas, dándose cerca del nivel del agua la corrosión máxima.

La corrosión de uno de los dos metales depende de sus características químicas, principalmente de la electronegatividad, de manera que de los dos metales, el que se degrada es el de menor electronegatividad.

A continuación se presenta la tabla de la serie galvánica (Tabla 4.1), donde el más próximo al extremo superior es el metal corroible o activo y el más próximo al extremo inferior es el metal noble o pasivo.

La corrosión se puede dividir, por su aspecto, en dos grandes ramas: la corrosión uniforme y la corrosión localizada.

#### 4.2.2. CORROSIÓN UNIFORME

Es el ataque del medio ambiente sobre grandes áreas de una superficie metálica, puede ser húmeda o seca, electroquímica o física. Es un fenómeno por el cual el espesor del material se va reduciendo paulatinamente, ya sea porque el óxido del metal no es adherente, o porque el medio disuelve a ese óxido. Como resultado, en las zonas de menor espesor se pueden producir perforaciones, la tubería pierde resistencia y las ranuras de la rejilla se agrandan, permitiendo la entrada de partículas mayores que las deseadas.

#### 4.2.3. CORROSIÓN LOCALIZADA

La corrosión localizada se realiza en zonas específicas de la tubería, y sus causas pueden ser macroscópicas y microscópicas.

##### 4.2.3.1 Corrosión macroscópica

La corrosión macroscópica se divide en:

##### ***Corrosión Galvánica***

Se presenta cuando están en contacto dos metales diferentes. Puede aparecer en pozos si se emplean metales distintos en la rejilla y el ademe liso, tubos de diferentes calidades o cuando la

Tabla 4.1 Serie galvánica (electronegatividad de metales), miliarium (2004)

Mínima electronegatividad Máxima corrosión (Extremo Corroíble o activo)
Magnesio
Aleaciones de magnesio
Zinc
Aluminio (25)
Cadmio
Aluminio resistente a la corrosión (17 ST)
Acero, Hierro, Hierro Fundido
CromoHierro,(ferrocromo ) activo
Acero inoxidable al cromoníquel 188 (activo)
Acero inoxidable al cromoníquelmolibdeno l883 (activo)
Soldadura de plomo, estaño o sus aleaciones
Níquel, Iconel (activo)
Cobre
Latón
Bronce
Monel
Soldadura de plata
Níquel (pasivo)
Iconel (pasivo)
Ferrocromo (pasivo)
Acero inoxidable cromoníquel 188 (pasivo)
Acero inoxidable Cromoníquelmolibdeno 1883 (pasivo)
Plata
Oro
Platino
Máxima electronegatividad Mínima corrosión (Extremo Noble o Pasivo)

bomba toca el tubo del ademe. Es una corrosión electroquímica.

disuelve el zinc, dejando el cobre poroso y poco resistente.

### ***Corrosión alveolar o picado***

Se produce si en la superficie de un metal aparecen diferencias de potencial eléctrico, por pequeñas variaciones de composición, acabado, dureza, impurezas, etc. Ello origina pilas galvánicas, fenómeno que ataca a uno de los metales. Este proceso se favorece si el agua contiene cloruros.

### ***Corrosión por erosión***

La corrosión por erosión se presenta cuando el medio corrosivo ataca preferentemente en las áreas donde se produce un desgaste mecánico originado por el movimiento de fluidos o sólidos, por ejemplo, en el lugar en que una bomba que vibra hace contacto con el ademe o en un pozo productor de arena en la zona del cedazo.

### ***Corrosión selectiva***

Es la disolución preferente de uno de los componentes de la aleación, dejando al metal restante. Este fenómeno se puede ver en el latón, donde se

### ***Corrosión por agrietamiento***

Las grietas o hendiduras aparecen generalmente en los traslapes, uniones y las aberturas del



cedazo, también pueden formarse por depósitos sobre la superficie y raspaduras en la película de recubrimiento. Las causas por las que sucede son los cambios de acidez en la grieta y la escasez de oxígeno que forma iones en la hendidura.

### ***Corrosión por exfoliación***

La corrosión se da en capas completas de material, el ataque es generalmente identificado por su aspecto escamoso. Esta corrosión sub superficial comienza sobre una superficie limpia, pero se esparce debajo de ella.

#### 4.2.3.2 Corrosión intergranular. (Microscópica)

Es la que se produce en ciertas impurezas de un metal, lo que lleva a la formación de zonas de debilidad, que puedan ocasionar la disgregación del metal. El ion cloruro es capaz de efectuar una acción de este tipo en los aceros inoxidable ordinarios, que no son adecuados para aguas salinas. Lógicamente el fenómeno tiene un efecto menor o nulo cuanto más puro sea el metal. Ataca preferentemente a los espacios intergranulares a nivel molecular, por lo que es muy difícil de observar, si no se tiene una muestra que analizar en microscopio.

## 4.2.4. PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN

En forma general, existen 4 tipos de prevenciones contra la corrosión:

### 4.2.4.1 Protección catódica

Este método para proteger tuberías enterradas o sumergidas consiste en colocar a lo largo de

ellas bloques de magnesio o zinc, unidos a la tubería mediante un cable conductor. La tubería se protege por tener electronegatividad alta y el magnesio o zinc cumplen la función de metal de sacrificio, el cual 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, con buenos resultados.

### 4.2.4.2 Uso de recubrimientos anticorrosivos

Los elementos expuestos a la corrosión en la superficie del terreno se pueden proteger utilizando recubrimientos anticorrosivos o mediante el galvanizado del hierro, en el que el hierro está recubierto por una película de zinc. Si se llega a romper el recubrimiento, éste actúa como metal de sacrificio, pues es menos electronegativo que el hierro, cuya corrosión no comienza mientras dure el zinc.

El hierro o acero galvanizado no es útil en aguas muy ácidas, o pozos a los que se les haga un tratamiento con ácido, pues el recubrimiento de protección se destruye rápidamente.

Estos métodos no son útiles en el caso de los pozos, pues cualquier recubrimiento o galvanizado exterior será erosionado durante el descenso de la tubería al pozo y en la colocación de la grava en el espacio anular; e internamente durante las maniobras de desarrollo y de instalación y extracción de bombas. Si la corrosión no es muy severa, da resultado el recubrir la rejilla o tubería con caucho o polietileno, o aplicando un doble galvanizado.

### 4.2.4.3 Selección de materiales

Si el cedazo y tubo son de Cloruro de polivinilo (PVC) la corrosión es nula, esta práctica se

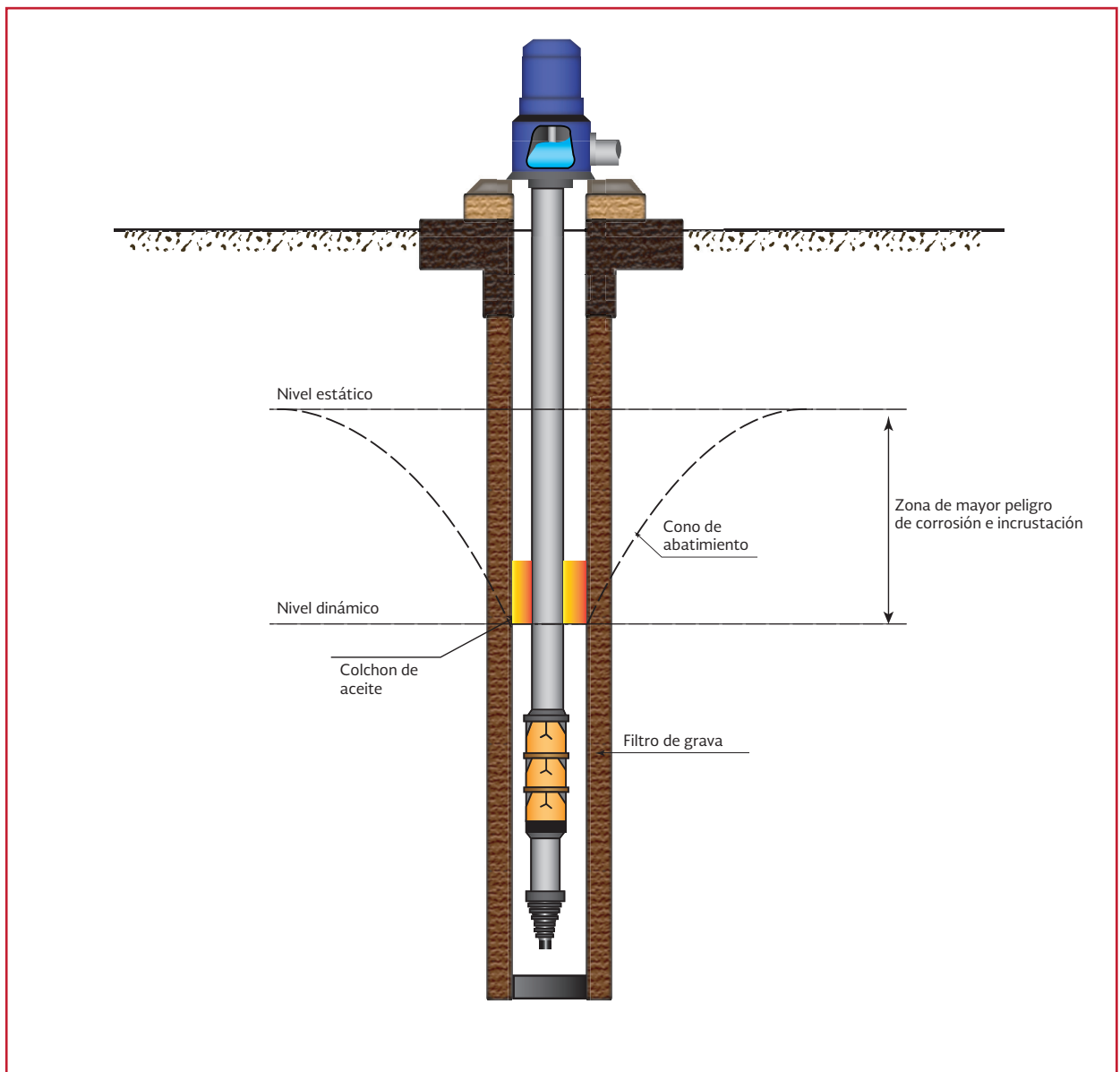
puede realizar cuando el estudio químico del agua indique una zona de extrema corrosión, tomando en cuenta las propiedades mecánicas del PVC.

En el caso de requerirse que la tubería sea de acero, se buscará acero de buena calidad y pureza y de suficiente espesor, tanto para el tubo del pozo como para la rejilla, diseñando al pozo de manera que la velocidad de entrada sea la correcta.

#### 4.2.4.4 Inhibidores de la corrosión

La porción del pozo más susceptible de ser atacada por la corrosión, o la incrustación, es la sometida a secado y mojado, siendo ésta la comprendida entre el nivel estático y el nivel dinámico. En pozos en que el agua nunca descienda hasta la zona filtrante, o tazones de la bomba, se pueden evitar estos ataques añadiéndole al pozo un colchón de aceite, que funge como inhibidor, lubricando la porción afectada (Ilustración 4.2).

Ilustración 4.2 Lubricación de la zona de aireación del ademe





# 5

## DESARROLLO DE POZOS

El desarrollo del pozo es una de las actividades primordiales en la construcción del pozo, que generalmente se repite varias veces a lo largo de su vida útil, como parte de los trabajos de mantenimiento y rehabilitación que todo pozo requiere, pues una vez que está fuera de operación y habiendo movido hasta él un equipo de rehabilitación, es absurdo no desarrollar el pozo, dada la mejora que experimenta en la mayoría de los casos. Se llama desarrollo a la serie de acciones de carácter físico o químico, tendientes a lograr una mejor eficiencia.

### 5.1. OBJETIVOS DEL DESARROLLO

Por varias razones, el desarrollo es un procedimiento fundamental para la terminación de un pozo nuevo y mejora sustancialmente el funcionamiento, de uno usado, sobre todo si la construcción del mismo no fue técnicamente aceptable. Generalmente, mediante el desarrollo se logran uno o varios de los siguientes objetivos:

- Mejorar la capacidad específica del pozo al limpiar las ranuras del cedazo y el filtro, además de mejorar la permeabilidad del acuífero en el entorno de la zona filtrante

- Estabilizar la formación arenosa alrededor del pozo, retardando su entrada a él, aun cuando el diseño del filtro no fuera el adecuado
- Se ha observado que pozos bien desarrollados, en zonas con aguas incrustantes o corrosivas, tienen una vida útil más prolongada que aquellos que no fueron desarrollados

En pozos perforados con máquina rotaria directa y lodos bentoníticos, el desarrollo es la única posibilidad de eliminar el enjarre de lodo (cake), que disminuye la permeabilidad en el entorno del pozo.

### 5.2. MÉTODOS DE DESARROLLO QUÍMICO

#### 5.2.1. TRATAMIENTO CON POLIFOSFATOS

Los polifosfatos, comúnmente conocidos como dispersores o dispersantes de arcillas, son agentes tensoactivos, similares a los detergentes, pero menos espumantes, que tienen la propiedad de separar los aglomerados de partículas, si se hace intervenir una fuerte agitación. El más

usual es el hexametafósforo de sodio, aunque también se utilizan otros polifosfatos, como el tetrapirofósforo sódico, el septafósforo sódico y el tripolifosfato sódico.

Este tratamiento no es estrictamente un método de desarrollo de pozo, pero puede incrementar notablemente su efectividad, cuando se explotan acuíferos granulares con una fracción arcillosa y cuando se emplea en pozos que han sido perforados con lodo bentonítico, por lo que este tratamiento debe formar parte del desarrollo propiamente dicho.

Las dosis recomendadas varían según el fabricante, entre 10 y 50 kg por cada m<sup>3</sup> de agua en el pozo, añadiéndole 1 kg de hipoclorito cálcico, que le confiere acción oxidante. El rebasar los 50 kg por cada m<sup>3</sup> no ofrece ningún efecto adicional. El tiempo de aplicación es mayor cuanto menor sea la dosis. Los polifosfatos pueden aplicarse combinados con ácido, sobre todo en pozos incrustados o con hipoclorito de calcio en los tratamientos de bacterias ferruginosas.

Los tratamientos con polifosfatos deben durar al menos 24 h, en las que se debe mantener el agua del pozo agitada y pueden requerirse dos o más tratamientos. El efecto cuando no se agita el agua, es prácticamente nulo. utilizar los parámetros mencionados en la norma NMX-AA-124-SCFI, para el uso de este polifosfato.

Clorato de calcio	2.5 máximo
Cloruro de calcio	2.0 máximo
Agua	9.0 máximo
Hierro (como Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.05 máximo
Insolubles	5.0 máximo

<b>Parámetros</b>	<b>Límites máximos permisibles mg/kg de Hipoclorito de calcio</b>
Arsénico	1
Bario	21
Cadmio	1
Cobre	1
Cromo	10
Manganeso	9
Mercurio	1
Plomo	1
Zinc	25

### 5.2.2. NIEVE CARBÓNICA

La nieve carbónica o hielo seco es anhídrido carbónico (dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>) sólido. Este tipo de desarrollo es útil sólo en condiciones un poco restrictivas y su efecto se debe reforzar con otras técnicas de desarrollo y estimulación. Es efectivo para producir un buen arrastre de finos y detritus que colmaten el acuífero, tanto en acuíferos consolidados como no consolidados. No requiere elevados costos y el equipo es reducido (nevera para transportar hielo seco desde la fábrica).

El hielo seco en contacto con el agua burbujea intensamente a medida que se va sublimando. La intensidad depende de la transferencia de calor desde el agua al sólido. Este aporte calorífico es lento, de modo que la formación de gas a veces es insuficiente para producir la expulsión del agua en el pozo, salvo que el sólido se añada

<b>Parámetros</b>	<b>Límites permisibles % en masa, base seca</b>
Cloro disponible	65-75
Cloruro de sodio	20.0 máximo
Hidróxido de calcio	3.0 máximo
Carbonato de calcio	5.0 máximo

finamente dividido, aunque así profundiza poco bajo el nivel del agua debido a la elevada superficie y a la flotación que produce el burbujeo: el descenso es tanto menor cuanto menos profundo sea el nivel del agua.

En pozos con un espesor de agua superior a 41 metros, el fenómeno cambia y se pueden producir expulsiones rápidas del contenido de agua en el pozo. Al ir descendiendo el bloque de  $\text{CO}_2$  sólido dentro del agua va aumentando la presión. Mientras no se rebasen los 42 metros el calor de cambio de estado es elevado y por tanto la formación de gas está muy limitada por el aporte de calor. En cuanto se llega a las condiciones del punto triple (41 metros de profundidad) o se rebasa esa profundidad, ya se puede pasar de sólido a líquido con un aporte calórico mucho menor con lo que el fenómeno de desaparición del sólido se acelera repentinamente ya que el líquido se elimina de la superficie del sólido con tanta o mayor rapidez que el gas, puesto que es muy soluble en agua.

La rápida dispersión del líquido en el agua permite a aquel tomar con facilidad las calorías que necesita para su paso a gas, produciéndose suficiente cantidad del mismo, con un notable aumento del volumen, superior a 150 veces, lo que puede producir el vaciado del agua del sondeo por proyección al exterior, formando una columna cuya altura puede a veces superar los 10 metros.

Si el nivel de agua es profundo puede que la columna no llegue a proyectarse al exterior. No obstante, en estos casos, aunque con menor intensidad, se tiene una agitación de vaivén en el pozo, similar a lo que produce una rápida descarga de aire comprimido o una pequeña carga de explosivo. Los finos son extraídos de la formación, en parte expulsados fuera y en parte se

quedan en el fondo del pozo, de donde hay que retirarlos con una cuchara.

En cualquier caso, la expulsión se produce cuando la velocidad de producción de gas es superior a la velocidad de escape normal de las burbujas.

El  $\text{CO}_2$  disuelto en el agua proporciona cierta acidez al agua, ayudando a poner en solución carbonatos (para favorecerlo se puede cerrar el pozo a fin de evitar el escape de  $\text{CO}_2$ ) y produce cierto desarrollo si el agua que los contiene se extrae antes de que precipiten, de modo similar a lo que sucede en la acidificación.

Si es conveniente, previamente se pueden añadir polifostatos al agua del pozo, para mantener las arcillas en suspensión. Los resultados mejoran si ha precedido un pistoneo u otro tipo de desarrollo por vaivén.

Si el acuífero está muy colmatado, es preciso obrar con sumo cuidado puesto que la succión producida puede ser muy fuerte y producir derrumbes, desperfectos en la rejilla y aún el aplastamiento de la misma o del tubo. Se recomienda efectuar una limpieza previa.

Las mejores condiciones de aplicación son cuando el espesor del agua en el pozo supera los 41 metros, aunque se pueden obtener resultados con 30 metros si el burbujeo es suficiente. Para que los pedazos de hielo seco alcancen la profundidad requerida, venciendo el efecto frenante del burbujeo, las experiencias realizadas señalan que es deseable una caída libre hasta el nivel del agua, de por lo menos 15 metros, aunque es preferible que supere los 20 metros. Con caídas inferiores a los 15 metros, es posible que no se adquiera suficiente velocidad de penetración en el agua, aunque el estado de división del

hielo juega un papel muy importante ya que a mayor división (mayor relación de superficie a volumen), mayor efecto frenante del burbujeo. Es usual emplear pedazos entre 2-5 kg, incluso mayores y dejarlos caer por la boca del pozo.

La cantidad de hielo seco a utilizar puede ser de aproximadamente 1 kg por m<sup>3</sup> de agua en el pozo. Es frecuente utilizar entre 30 y 150 kg por experiencia. Las erupciones tardan en producirse entre 40 y 100 segundos y duran hasta 30 segundos (Miliarium Aureum, S.L 2001-2011. última edición).

### 5.2.3. ACIDIFICACIÓN

Los ácidos se aplican a los pozos principalmente para eliminar incrustaciones de carbonato cálcico y magnesico; pueden emplearse diferentes ácidos.

Las formaciones fisuradas y/o karstificadas de calizas y dolomías son las más adecuadas para realizar desarrollos químicos mediante acidificación. En formaciones detrítico-carbonatadas (calcoarenitas) la acidificación puede producir efectos negativos.

La acidificación consiste en atacar el medio acuífero, cuando está formado por carbonatos, mediante un ácido. La reacción enérgica de los carbonatos con un ácido fuerte puede mejorar la transmisividad de las formaciones fisuradas y/o karstificadas, al limpiar, ampliar o interconectar los conductos de circulación preferencial. Las variaciones de los equilibrios químicos entre las formaciones carbonatadas y el agua del sondeo pueden desplazar la capacidad de disolución de los carbonatos, y de esta forma mejorar sustancialmente la permeabilidad en el entorno del sondeo. Este efecto se consigue mediante la adi-

ción de soluciones ácidas, siendo el ácido clorhídrico el producto más utilizado.

El ácido clorhídrico disuelve a la caliza con rapidez, y algo más lentamente, la dolomía, formándose  $\text{Cl}_2\text{Ca}$  y  $\text{Cl}_2\text{Mg}$  solubles respectivamente y desprendiéndose grandes cantidades de gas carbónico.

No es conveniente emplear "ácido sulfúrico", ya que con el Ca forma  $\text{SO}_4\text{Ca}$  ya que su solubilidad es limitada y tiende a depositarse en el acuífero.

En los acuíferos fracturados, en especial cuando el pozo corta unas pocas fisuras de anchura pequeña, las pérdidas de carga de circulación son elevadas, en especial cerca del pozo. La acidificación ayuda mucho a la limpieza y ensanchamiento de las fisuras a condición de que el ácido penetre una distancia considerable. Pero para ello se requiere introducir gran cantidad de ácido (varias toneladas o decenas de toneladas) de forma rápida, a fin de que penetre suficientemente antes de agotar su capacidad de disolución, ayudándolo con la introducción de un volumen mayor de agua. El desarrollo que ya produce el ácido al llegar al acuífero, facilita la introducción de las siguientes cantidades de ácido y del agua, a veces de forma muy espectacular, puesto que si el pozo no se ha limpiado previamente con cuidado, se produce una rápida descolmatación.

En la estimulación de pozos profundos hay que tener en cuenta que el ácido puede tardar cierto tiempo en alcanzar la formación. Si además de tener el nivel piezométrico profundo se presentan un caudal apreciable, la introducción del ácido y del agua se puede realizar de forma sencilla y económica por gravedad, aunque conviene realizar una forma segura en las instalaciones

para facilitar y controlar bien las operaciones y evitar las peligrosas salpicaduras o rociaduras con ácido en caso de que escape el anhídrido carbónico producido y se proyecte al exterior con el ácido contenido en el interior del pozo.

Para que la acidificación cumpla su misión, es indispensable efectuar una limpieza del pozo antes de que parte del Ca y Mg disueltos se re-depositen al descender la acidez, junto con las arenas, arcillas y otros materiales en suspensión. Si el nivel del agua es poco profundo y se puede obtener una inmersión suficiente, el método más práctico es el desarrollo mediante aire comprimido. Si no se pudiera realizar, se debe instalar la bomba lo antes posible o incluso realizar la acidificación con la bomba instalada. Es recomendable no diferir el bombeo más allá de 1-2 horas, ni hacerlo antes de media hora.

A la hora de planificar una acidificación es esencial calcular el pH final de la disolución, el volumen a inyectar, el tiempo estimado de reacción, etc. Además, es conveniente realizar la acidificación por etapas, alternando con periodos de bombeo para desalojar los productos disueltos, y evitar la reprecipitación parcial del Ca y Mg al perder acidez la solución. Los volúmenes a inyectar en cada etapa suelen ser crecientes, pues se supone que la zona de admisión se ha ido incrementando.

Las dosis de ácido dependerán de la propia composición de la formación carbonatada a tratar o del grado de fisuración, aunque suele estimarse un volumen de ácido de tres veces el volumen de agua contenido en el sondeo.

Si las formaciones carbonatadas que van a desarrollarse tienen contenidos relativamente importantes de óxidos de hierro y aluminio, deben añadirse al ácido clorhídrico otros ácidos como

el láctico o el cítrico (se recomiendan dosis de 1-10 g/l), inhibidores de corrosión (fosfatos, polifosfatos, gelatina) y retardadores (cloruro cálcico, agentes tensoactivos).

Además de estos aditivos también se suelen añadir antiespumantes (alcohol amílico, 1-10 g/l), inhibidores de corrosión (fosfatos, polifosfatos, gelatina) y retardadores (cloruro cálcico, agentes tensoactivos).

En algunos casos la presión del CO<sub>2</sub> es favorable, estando el pozo cerrado, pues ayuda a la penetración del ácido y después al abrir puede provocar una primera salida de agua al exterior. No es raro que en acuíferos libres el CO<sub>2</sub> consiga escapar a través del terreno y en el pozo sólo se obtengan pequeñas cantidades.

Parte del agua que se extrae en el bombeo es salina e incluso, puede ser ácida. Por esta razón su vertido se tiene que efectuar con precauciones para que no cause problemas de contaminación.

El desarrollo se puede completar con pistones o cuchareo ayudado con polifosfatos.

Las técnicas de acidificación se pueden clasificar según se realiza ésta:

- por gravedad
- por inyección a presión

#### 5.2.3.1 Acidificación por gravedad

Consiste en introducir el ácido desde la boca del sondeo o mediante un varillaje. La penetración del ácido en las formaciones a desarrollar suele ser limitada, puesto que no existe otra presión que la de la propia columna de agua/ácido.



Cuando el ácido no se puede introducir por gravedad en condiciones satisfactorias (niveles piezométricos altos y/o bajo caudal de admisión inicial) es necesario recurrir a la inyección a presión con una bomba de alto caudal y alta presión, incluso tratando de llegar a la fracturación hidráulica, proceso que requiere cementar el pozo por encima del acuífero y establecer una cabeza de pozo para la inyección, incrementando el costo del tratamiento.

#### 5.2.3.2 Acidificación por inyección a presión

Dentro de la acidificación por inyección a presión se distinguen dos tipos en función de si se controla o no la presión en el cabezal del sondeo mediante un cierre hermético. En el sistema de cabezal abierto, el más sencillo, se provoca una cierta sobrepresión inyectando con bomba. El sistema de cabezal cerrado es el más eficaz.

La acidificación con control de presión en cabezal consiste en montar en el cabezal del sondeo un cierre hermético al que se acopla la tubería de inyección, conectada a la bomba con una válvula intercalada. La presión en la línea de inyección y en el interior del sondeo se controla mediante un sistema de manómetros y llaves. La bomba, que suele ser de pistones, debe tener suficiente capacidad de caudal/presión.

Con este dispositivo se logra que la propia presión del CO<sub>2</sub> liberado en el proceso incremente la capacidad de penetración del ácido, provocando incluso una cierta hidrofracturación. La acidificación con cabezal cerrado sólo se puede realizar cuando la estabilidad del emboquille esté suficientemente garantizada por una cementación.

Aun así, es muy importante controlar la presión, evitando valores excesivamente elevados. Aun así, es bastante frecuente que se produzcan erupciones de CO<sub>2</sub> en el entorno del emboquille del pozo (Miliarium Aureum, S.L. 2001, 2011).

#### 5.2.4. CLORACIÓN

Consiste en añadir cloro activo al agua del pozo, con objeto de que mate las bacterias y elimine el limo orgánico asociado. La acidificación también mata las bacterias, pero no elimina el limo orgánico. El cloro se puede aplicar como gas disuelto previamente en el agua o directamente, pero el medio más fácil y seguro es su manejo como hipoclorito cálcico, en estado puro o disuelto en agua. Se precisan concentraciones de cloro activo, en el pozo, de 100 a 200 p.p.m., y como máximo 500 p.p.m. Para el cálculo de las concentraciones se cubica el agua en el pozo. El hipoclorito cálcico tiene un 70 por ciento de cloro activo. Bajo estas premisas, para preparar soluciones para un metro cúbico de agua se requieren las siguientes cantidades de hipoclorito cálcico:

- Concentración de 100 p.p.m.: 143 gr
- Concentración de 200 p.p.m.: 286 gr
- Concentración de 300 p.p.m.: 429 gr
- Concentración de 400 p.p.m.: 571 gr
- Concentración de 500 p.p.m.: 715 gr

Si se desea que la cloración sea efectiva, conviene repetir el tratamiento 3 o 4 veces.

En caso de que no fuera posible la utilización del hipoclorito de calcio, puede emplearse el hipoclorito de sodio, el cual se obtiene fácilmente en forma de blanqueador de ropa (lejía).

La mayor parte de las presentaciones comerciales de este producto contienen un 5 por ciento de cloro activo, aunque la máxima concentración puede llegar a un 20 por ciento.

La NOM-003-CNA-1996 menciona. Después de que el desinfectante haya sido aplicado, se agitará el agua del pozo para lograr una buena mezcla y se inducirá el contacto de la mezcla agua-desinfectante con las paredes del ademe, rejilla, filtro y formación del acuífero.

Posteriormente, se debe circular la mezcla dentro del ademe con la columna de bombeo, y luego extraerla mediante bombeo. Después de que el pozo haya sido desinfectado, debe ser bombeado hasta que no se detecten residuos del desinfectante utilizado.

En la Tabla 5.1 se presentan los litros de blanqueador necesarios para preparar 1 m<sup>3</sup> de solución a diferentes concentraciones, según distintas proporciones de cloro activo en el hipoclorito de sodio.

Al hacer un tratamiento de cloración se debe considerar el carácter altamente agresivo del cloro que actúa directamente sobre las partes activas del pozo, sobre todo si se rebasa la concentración máxima, por tanto, es aconsejable que antes del tratamiento se extraiga la bomba.

### 5.3. MÉTODOS DE DESARROLLO FÍSICO

Los procedimientos de desarrollo físico logran su objetivo mediante la agitación energética del agua y la acción del flujo y reflujo del agua desde y hacia el pozo. El efecto del desarrollo se percibe desde el momento de la ejecución, por la cantidad de azolve extraído y por el reacomodo del filtro granular, manifestándose en un descenso del mismo por el espacio anular del pozo. Es indispensable que conforme el filtro descienda, se reponga de inmediato. Si se obtiene mucho azolve, sin el descenso correspondiente, se debe sospechar la existencia de acuñaamientos del filtro ("puentes").

Tabla 5.1 Cloración de pozos

Concentración Cl en p.p.m.	Litros de blanqueador por m <sup>3</sup> de agua en el pozo		
	5 por ciento	7 por ciento	10 por ciento
100	2.00	1.43	1.00
200	4.00	2.86	2.00
300	6.00	4.28	3.00
400	8.00	5.72	4.00
500	10.00	7.15	5.00

Referencia de la NOM-003-CONAGUA

### 5.3.1. DESARROLLOS CON BOMBA DE POZO PROFUNDO

El equipo necesario es una bomba de aforo, capaz de generar fuertes abatimientos al pozo. Estos desarrollos provocan un fuerte desgaste en el equipo de bombeo, debido a los frecuentes cambios de esfuerzos a que se ve sometido y al manejo de agua turbia.

#### 5.3.1.1 Sobrebombeo

Método sencillo y económico pero incompleto que consiste en bombear el pozo con un caudal superior al previsto en su régimen de explotación. Con ello se provocan velocidades de flujo superiores a las que serán habituales, movilizan- do y eliminando las fracciones finas en un plazo de tiempo muy inferior al que se precisaría en su régimen normal de explotación.

La efectividad de este método se ve reducida por el hecho de que el fuerte flujo de bombeo es flujo horizontal-unidireccional (sólo va en un sentido) de modo que los granos finos de arena se trasladan hacia la rejilla y se acumulan entre los granos gruesos formando "puentes de arena".

Para evitar la formación de puentes o acumulaciones se debe mantener el agua lo más agitada posible, bombeando intermitentemente. Puesto que el sobrebombeo directo no puede producir la agitación, el desarrollo adecuado del pozo quizá necesite el empleo de otros métodos en los cuales se consiga el efecto de inversión del caudal.

Requiere un equipo de bombeo de gran potencia que no siempre está disponible. Si para el sobrebombeo se emplea la bomba que luego quedará instalada en el pozo, se le expone a un exceso

de desgaste y pérdida de eficiencia y también a la posibilidad de quedar obstruida por la arena. Si ocurriese esto último, habría que desmontar y limpiar la bomba antes de ponerla en servicio definitivo.

No se debe olvidar que el caudal específico de un pozo no puede aumentar mucho cuando se desarrolla empleando únicamente la técnica del sobrebombeo.

Algunos expertos lo consideran un método idóneo para formaciones acuíferas fracturadas, para la eliminación de las fracciones finas acumuladas en las fracturas (Miliarium Aureum, 2001, 2011).

#### 5.3.1.2 Bombeo alternante

Con este sistema se intenta evitar la formación o la ruptura de los puentes de arena mediante el vaivén o agitación de la formación acuífera con la consiguiente formación de un flujo horizontal-bidireccional.

Consiste en provocar paros y arranques sucesivos de la bomba, con el fin de crear variaciones bruscas de presión, de forma que el agua retenida en la columna de impulsión retroceda y penetre por los filtros al sondeo. Para ello se utiliza preferentemente una bomba centrífuga de eje vertical, pero es de esperar un gran desgaste del material. No se coloca válvula de pie para que el agua de la columna de bombeo pueda caer al pozo.

El efecto que se consigue es hacer bajar y elevar intermitentemente el nivel del agua del pozo, de manera que la dirección del caudal queda invertida alternativamente. El caudal de salida de este ciclo deshace los puentes de las partículas

de arena y el caudal de entrada traslada el material fino hacia el filtro y el interior del pozo.

A pesar de reducir efectivamente la formación de puentes, el lavado a contracorriente no es lo bastante potente como para recoger todo el material fino sin combinarlo con la oleada, el cuchareo o el bombeo.

El efecto conseguido es semejante al del pistoneo, aunque se puede lograr mayor penetración.

Existen varias modalidades dependiendo de si se deja recuperar totalmente el nivel antes de volver a arrancar la bomba, o de si llega a bombearse al exterior o sólo hasta la boca del sondeo.

- Se pone en marcha la bomba a plena capacidad hasta conseguir el máximo descenso posible de nivel de agua en el pozo. Se para la bomba y el agua retrocede rápidamente por la columna de la misma retornando al pozo y penetrando en el acuífero a causa de la elevación de nivel que se produce. Estos movimientos de parada y arranque se repiten hasta que el pozo no dé señales de mejora adicional
- Por este método se pueden conseguir máximas variaciones de carga hidráulica, alcanzándose un alto grado de agitación. Resulta bastante eficaz y no castiga en exceso el equipo de las bombas
- Se bombea el pozo a gran caudal y al máximo descenso de nivel, pero en lugar de dejar que el pozo recobre completamente su nivel de agua estático, se pone de nuevo en marcha la bomba después de un corto intervalo de tiempo. El cambio rápido de arranque y parada produce cambios en la carga hidráulica,

velocidad y sentido de caudal, y el resultado es un tratamiento relativamente forzado de la formación acuífera. Es aconsejable no poner en marcha la bomba antes de su para total, ya que podría romperse el eje de transmisión

- Se bombea el pozo hasta que el agua se descargue en la superficie y luego se permite que el agua retroceda por la columna de la bomba, repitiéndolo sucesivamente. No debe hacerse esfuerzo alguno para hacer bajar el nivel del agua, ni tampoco para retenerla a un punto muy bajo. El objeto de este método es, simplemente, descargar oleadas fuertes y cortas sobre la formación
- Se vierte agua dentro del pozo lo más rápidamente posible y luego, se extrae agua del pozo con una cuchara o bomba de arena, con el objeto de conseguir un aumento brusco de carga en el pozo y cambiar el sentido del caudal. Cuanta más agua se vacíe y extraiga con la cuchara, más vigorosa será la agitación en la formación y el material fino pasará al pozo con mayor facilidad. Se puede hacer circular de nuevo el agua extraída del pozo, después de pasarla por un filtro o de verterla en un tanque de decantación. Si no se dispone de otros medios más eficaces, este método se puede emplear por muy pequeño que sea el diámetro del pozo

Cualquiera de estos métodos tiene la desventaja de castigar el equipo de bombeo y no es lo bastante potente para los pozos que necesitan un desarrollo energético. Solamente con la experiencia y la práctica se puede determinar cuál de estos métodos ha de aplicarse en cada caso específico.

Antes de empezar el oleaje y para evitar el peligro de que la arena obstruya la bomba, el bombeo debe empezarse con un caudal reducido e ir aumentando gradualmente al máximo.

El mejor método de lavar un pozo a contracorriente probablemente sea introduciendo por gravedad o a presión una gran cantidad de agua provocando de esta manera una elevación del nivel del pozo.

Una primera forma es el simple lavado, introduciendo agua por gravedad o a presión, siguiendo un cuchareo o bombeo. Otra forma consiste en introducir el agua a presión a través de una tubería que llega hasta la rejilla del pozo, y producir intermitentemente descensos bruscos de presión abriendo una válvula lateral en la cabeza del pozo. Es un medio bastante eficaz para efectuar el desarrollo y se puede emplear tanto en pozos grandes como en pequeños.

Si existe el peligro de descensos de materiales finos de otras formaciones, las operaciones se pueden realizar pero poniendo especial cuidado.

Puede ocurrir que este sistema no produzca el resultado deseado si no se emplea agua suficiente para llevar a cabo el lavado y si no se realizan las operaciones alternativas de lavado y limpieza sin pérdidas de tiempo. (Miliarium Aureum, S.L. 2001,2011).

### 5.3.2. DESARROLLOS CON BOMBA DE INYECCIÓN

El equipo necesario es una bomba de inyección, de preferencia de pistón dúplex, similar a las usuales en la perforación rotaria, tubería de inyección y accesorios, según el método empleado. Esto adecua el método de desarrollo a pozos

perforados con máquinas rotarias directas, ya que cuentan con la bomba y tubería requeridas. El alto costo horario de los equipos y los consumos de agua, que pueden ser altos, origina que estos métodos de desarrollo resulten caros, en términos relativos a los otros desarrollos físicos.

Son métodos de lavado a contracorriente más vigorosos que los efectuados con bomba de pozo profundo y consisten en bombear agua desde el interior de la rejilla, por medio de una tubería (usualmente la de perforación). Generalmente da muy buenos resultados iniciar la inyección bombeando dispersantes de arcillas en la proporción y cantidad establecidas. Presenta tres variables:

#### 5.3.2.1 Chorro vertical y pozo abierto

Se manda una línea hasta el fondo del pozo por la que se envía agua a presión, con el caudal máximo que permita la bomba. El azolve se extrae con una bomba de arena, que debe caber en el pozo sin necesidad de extraer la tubería.

#### 5.3.2.2 Chorro horizontal y pozo abierto

Esta variante es similar a la anterior en lo básico, pero con una herramienta adicional que la hace más efectiva. Consiste en una serie de toberas colocadas horizontalmente, por las que sale el agua a alta velocidad para estrellarse directamente contra el cedazo (Ilustración 5.1).

Se baja la tubería, con las toberas en el extremo inferior, hasta el inicio del tramo filtrante superior. Se bombea el agua mientras se hace girar lentamente la sarta a no más de 1 r/min, para que los chorros recorran el perímetro del cedazo. Se mantiene la sarta en ese nivel duran-

te 2 o 3 minutos y se baja 15 cm, repitiéndose la secuencia hasta alcanzar el azolve que se ha venido depositando en el fondo del pozo.

Se extrae la sarta y después el azolve con una bomba de arena o cuchara común.

Se repite la operación hasta que el azolve producido sea tan poco que indique la conveniencia de suspender el tratamiento. Un buen desarrollo puede requerir recorrer el pozo varias veces.

Las toberas pueden ser de 2, 3 ó 4, con orificios de 0.6 a 1.3 cm de diámetro (1/4" a 1/2"), según la bomba y cantidad de agua disponible, pero tratando siempre que la velocidad de salida del agua en las toberas no sea menor de 46 metros/s (150 pies/s). El espacio anular entre cedazo y toberas será de 2.5 cm (1 pulgada).

### 5.3.2.3 Chorro vertical y pozo cerrado

Se sella herméticamente la boca del pozo con una tapa que deja pasar la tubería de inyección y va provista de una descarga lateral cerrada con una válvula (preferentemente de paso rápido) y un manómetro (Ilustración 5.2).

Con la tubería en el fondo del pozo y la válvula de descarga cerrada, se le aplica presión al pozo mediante la bomba, registrándose la presión alcanzada. Se abre rápidamente la válvula de descarga hasta recuperar la presión 0.00. Se repite este ciclo tantas veces como sea necesario.

La efectividad del tratamiento se calibra por la cantidad de azolve extraído al descargar el pozo y la dificultad creciente en levantar presión al inyectar, debido al incremento de la permeabilidad del acuífero en el entorno del pozo.

### 5.3.3. DESARROLLOS CON OLEADA MECÁNICA O PISTONEO

El equipo necesario es una perforadora de percusión provista de un pistón, cuchara y una punta de perforación adecuada. Por consiguiente resulta el método más adecuado para el desarrollo de pozos perforados con equipo de percusión, el cual consiste en comprimir y aspirar el agua en el pozo para producir un enérgico flujo de agua, hacia adentro y hacia afuera del acuífero a través de las ranuras de la rejilla, y forzar el material más fino del acuífero a entrar en el pozo. Este material debe ser retirado después, utilizando

Ilustración 5.1 Lavado horizontal y pozo abierto

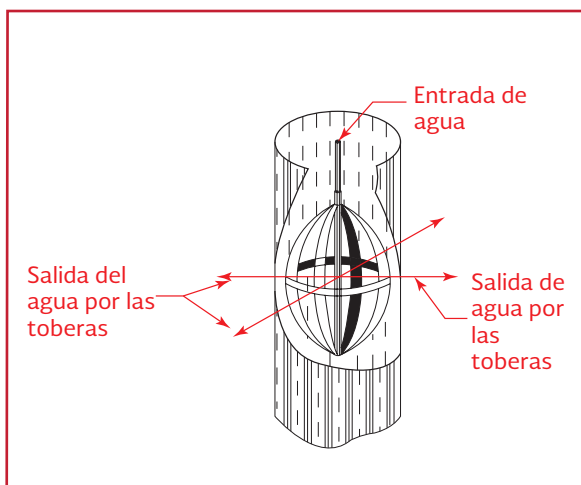
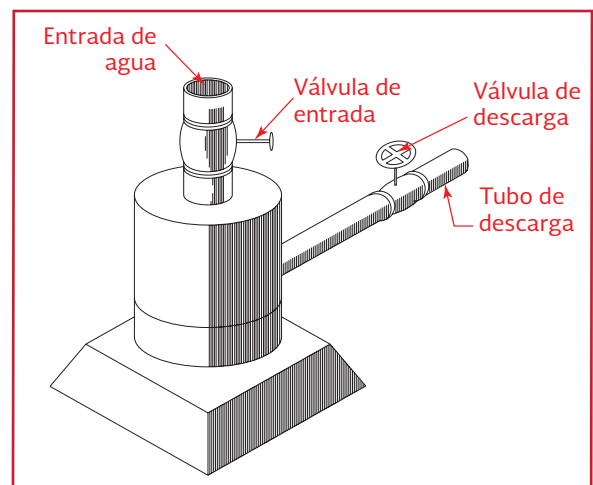


Ilustración 5.2 Lavado de pozo con chorro vertical y pozo cerrado



los métodos disponibles (cuchara, etcétera). Si el pozo contiene lodo de perforación es conveniente realizar una limpieza previa por bombeo o con chorro de agua.

Para producir el efecto de vaivén se puede emplear una cuchara con contrapeso o barra de perforación (con un enrollado de cuerda que actúe como cierre) para obtener la acción de oleada, pero ambos procedimientos resultan en general poco eficaces.

Lo normal, especialmente en pozos perforados a percusión, es hacer subir y bajar un pistón, al que también se da el nombre de "émbolo buzo", dentro del entubado o dentro de la rejilla, aunque esto último suele ser menos recomendable si existen arcillas o se tiene poca experiencia. A veces, ciertos fracasos se deben a trabajos incorrectamente realizados o no adecuados a las circunstancias del pozo, y por eso los sondistas poco experimentados evitan realizar el pistoneo.

El pistón normalmente se confecciona con discos de correa transportadora o de cuero, los cuales se prensan entre otros de madera dura; el conjunto se aprieta entre dos discos de acero. Los discos de correa o de cuero se cortan de manera que sean de un diámetro igual al de la rejilla. Los de madera dura deben tener un diámetro de 2.5 cm menor que el diámetro de la rejilla y los de acero un diámetro unos 5 cm menor.

Existen dos tipos de pistones o émbolos buzo:

- Pistón cerrado o macizo
- Pistón abierto o de válvula

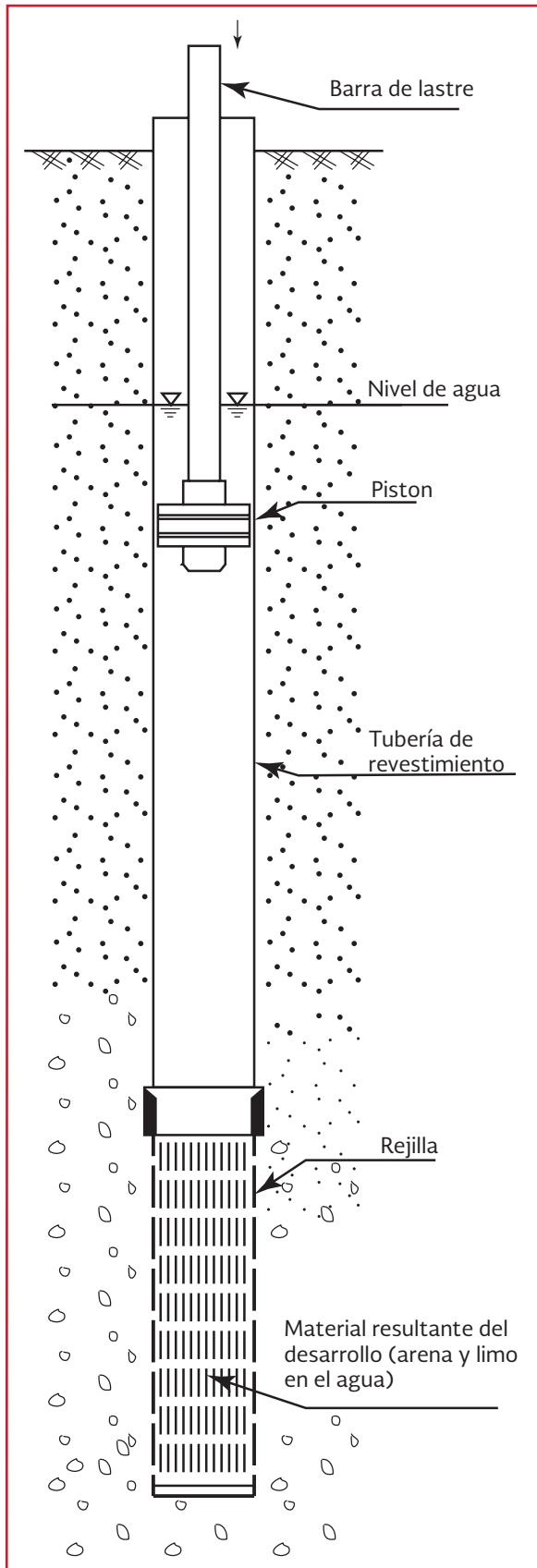
El pistón abierto presenta unas perforaciones longitudinales, cubiertas por una lámina de goma en la parte superior. Al descender el pistón, el efecto de empuje se amortigua pues el agua escapa hacia la parte superior a través del pistón. Cuando el pistón asciende, la lámina de goma asienta sobre la cara superior del pistón y la succión es mucho más intensa que el empuje y se evacua de manera continua el material fino en vez de forzarlo hacia el exterior en cada descenso. Su acción es más suave y está indicada cuando hay arcillas o en las primeras operaciones de pistoneo, antes de utilizar el pistón cerrado. En formaciones poco permeables o cuando la formación suprayacente consta de arena fina, limo o arcilla blanda, deben emplearse con extremo cuidado los pistones macizos o cerrados, ya que su acción es violenta y puede introducir limo y arcilla en el acuífero a un ritmo superior al de la extracción.

Antes de empezar con el pistoneo es necesario limpiar el pozo para estar seguro de que entre algo de agua y extraer la arena que se haya depositado dentro de la rejilla.

La Ilustración 5.3 muestra la instalación para el desarrollo de pozos por pistoneo. Se hace bajar una barra con el pistón hasta unos 3-5 metros por debajo del nivel estático. Como el agua es incomprensible, la acción del pistón se transmite a la zona de la rejilla a través de la columna de agua.

Para un buen trabajo de desarrollo es necesario lastrar el pistón con un peso suficiente para producir un rápido movimiento descendente del

Ilustración 5.3 Instalación para desarrollo de pozos por pistoneo.



pistón y además, el motor de la sonda debe tener la potencia suficiente para levantar rápidamente este peso. Dependiendo del diámetro de la rejilla se recomiendan los siguientes pesos de lastre del pistón, ver Tabla 5.2.

El proceso de pistoneo debe iniciarse lentamente. A medida que progresa el trabajo se puede aumentar la velocidad con tal que las herramientas se eleven y caigan de manera suave, sin excesivos tirones en el cable. Después de pasados algunos minutos del trabajo de pistoneo, se deben retirar las herramientas y bajar la cuchara o bomba de arena al pozo para efectuar la extracción de los sedimentos.

La cantidad de arena que entra en la rejilla puede variar dentro de unos límites muy amplios, los cuales dependen de la longitud de la rejilla, el tamaño de las ranuras, las características de las formaciones y la duración de la operación de pistoneo.

Cuando la rejilla ya contenga una cantidad considerable de arena, deben detenerse las labores de pistoneo, puesto que la eficiencia de la operación disminuye considerablemente. La operación de pistoneo generalmente se da por concluida cuando después de una hora de pistoneo la cantidad de arena recogida sea despreciable.

Muchos perforadores experimentados prefieren trabajar con el pistón dentro de la rejilla.

Un procedimiento que se utiliza con gran éxito en el caso de tener que desarrollar rejillas largas es el siguiente: Se hace descender el pistón hasta la parte inferior de la rejilla. Se marca el cable, luego se levanta el pistón aproximadamente 10 cm y se empieza a pistonear. El movimiento de la máquina debe ser lento al principio, aproxi-



Tabla 5.2 Diámetros de rejilla y peso a usar

Diámetro rejilla (mm)	150	200	250	>300
Peso (kg)	600	800	1000	>1000

Referencia de Miliarium Aureum, S.L 2001, 2011.

madamente de 20-25 pistonadas por minuto. Al cabo de 15-20 minutos se para la máquina y se baja el pistón hasta el fondo para medir la cantidad de arena arrastrada al interior del pozo y se toma nota de ello. Entonces se levanta el pistón para repetir la operación en un tramo por encima del anterior, pero que se solape ligeramente, y se repite la misma secuencia de trabajo. Se continúa desarrollando así hasta llegar a la parte superior de la rejilla. Cada vez que se hayan acumulado de 1.5-2 metros de arena en la rejilla se saca el pistón y se extrae la arena del pozo.

Durante la segunda etapa de desarrollo se trabaja a un ritmo de 30-35 pistonadas/minuto.

Se repiten las operaciones anteriores, empezando con el pistón situado en la parte inferior de la rejilla, y con duraciones de 15-20 minutos en cada tramo.

Si fuera necesario recurrir a una tercera, el movimiento debe ser suave pero todo lo rápido que la máquina lo permita. Los periodos de tiempo pueden ser más largos que para la primera y segunda etapas. Generalmente la cantidad de arena arrastrada al interior de la rejilla, se irá reduciendo desde un máximo al iniciar el desarrollo hasta un mínimo al final. La estabilización del proceso final se consigue mediante el bombeo. Para ello se instala una válvula de regulación de caudal en la tubería de descarga de la bomba y se inicia el funcionamiento con la válvula casi cerrada, abriéndola progresivamente hasta que el agua salga completamente limpia.

Se aconseja usar polifosfatos (hexametáfosfato de sodio) para acelerar el trabajo de desarrollo. Se recomienda usar una dosis de 15 kg por m<sup>3</sup> de agua. La solución de hexametáfosfato se debe dejar en el pozo al menos durante toda una noche, realizándose todas las operaciones de pistoneo, ver Ilustración 5.4.

#### 5.3.4. DESARROLLO NEUMÁTICO

Con los sistemas de desarrollo con aire comprimido se consiguen efectos equivalentes a la combinación de pistoneo y bombeo. Básicamente consiste en alternar fases de bombeo mediante "air lift" con inyección brusca de aire.

El empleo de aire comprimido para efectuar el trabajo de desarrollo puede ser un proceso rápido y eficaz.

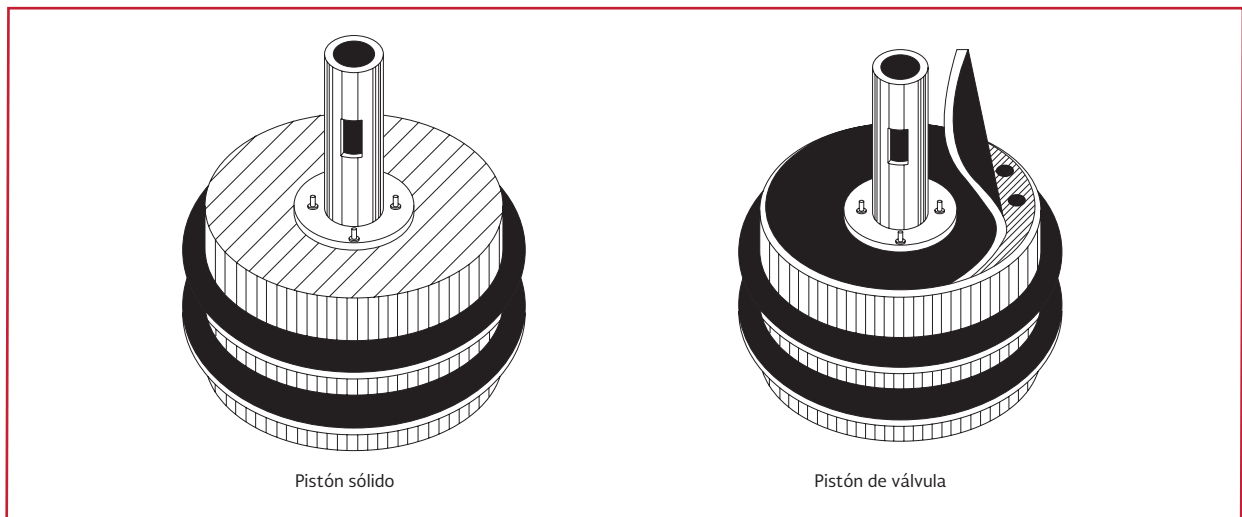
Se pueden emplear dos sistemas:

- Método de cabezal abierto
- Método de cabezal cerrado

En ambos casos se requiere disponer de un considerable equipo que debe constar de:

- Compresor de aire de tamaño adecuado, con depósito de 0.5 m<sup>3</sup> de capacidad, o más
- Tubo de agua y tubo de aire con los medios adecuados para elevar y bajar, independientemente cada uno de ellos
- Manguera flexible de aire a alta presión

Ilustración 5.4 Pistones para desarrollar pozos



- Varios accesorios como tubos, válvulas, conexiones T, etcétera

El compresor debe dar una presión mínima de 7 kg/cm<sup>2</sup> además es necesario disponer de una cantidad aproximada de 5.2 litros de aire por cada litro de agua a extraer.

En la Tabla 5.3 se exponen los tamaños recomendados para las tuberías de bombeo y de aire así como las capacidades de bombeo en cada caso.

#### 5.3.4.1 Desarrollo neumático a pozo abierto

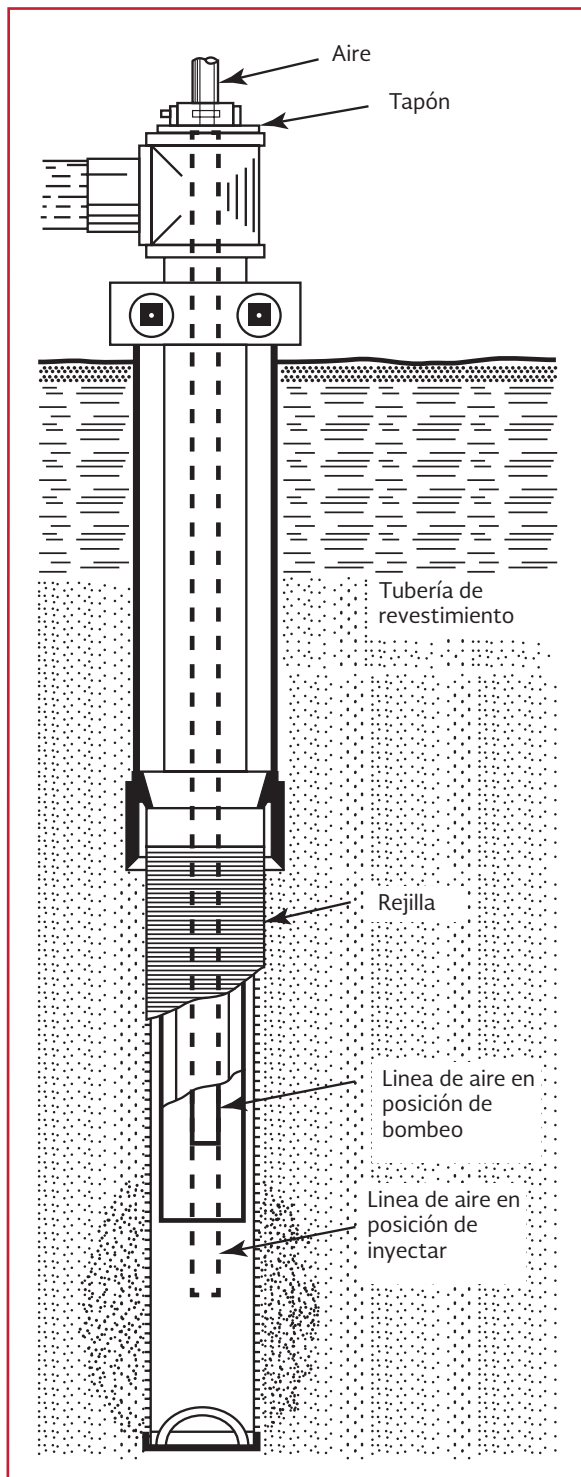
El desarrollo se basa en el principio de combinar la oleada y el bombeo. Se produce un fuerte oleaje soltando repentinamente grandes volúmenes de aire en el pozo y el bombeo se efectúa por elevación normal del agua mediante aire comprimido. El éxito del proceso depende de la correcta aplicación de la combinación oleada-bombeo. La Ilustración 5.5 se representa el montaje necesario para desarrollar un pozo con

Tabla 5.3 Tamaños recomendados para las tuberías de bombeo y de aire así como las capacidades de bombeo

Capacidad de bombeo (L/s)	Diámetro de la tubería de descarga (cm)	Diámetro de la tubería de aire (cm)
1.6 a 3.1	51	13
3.1 a 6.3	76	19
6.3 a 9.4	89	25
9.4 a 12.5	102	32
12.5 a 18.8	127	38
18.8 a 25.0	152	51
25.0 a 46.9	203	64
46.9 a 75	254	76
75 a 109	305	89

Referencia de Miliarium Aureum, S.L 2001, 2011

Ilustración 5.5 Método de cabezal abierto



aire comprimido mediante este método, indicando además, la forma correcta de colocar la tubería de bombeo y el tubo de aire dentro del pozo. La tubería se puede manejar adecuada-

mente con el cable de sondear o entubar y el tubo de aire con el cable de cuchareo u otro cable de izar disponible. Se acopla una conexión T en la parte superior de la tubería de bombeo con un tubo de descarga en la boca lateral y un manguito, lo bastante grande para que quede libre de los acoplamientos del tubo de aire, en la boca superior. El tubo de aire se conectará con el depósito de aire comprimido mediante una manguera de longitud suficiente para permitir el movimiento arriba y abajo de dicho tubo de aire. Se dispondrá asimismo de una válvula de apertura rápida.

Para que el proceso de desarrollo sea exitoso es necesario que la inmersión de la tubería de aire sea por lo menos de un 60 por ciento.

La eficacia del trabajo queda reducida a media que la inmersión es menor del 60 por ciento. En los pozos profundos, donde hay una carga considerable por encima del fondo, aun cuando sea baja la inmersión, se puede realizar un buen trabajo mediante el proceso de descargas muy rápidas de presión. Cuando la carga de agua y la inmersión sean bajas, este método no tiene ningún valor práctico. Antes de extraer agua o lodo del pozo, se debe introducir aire a presión durante algún tiempo y lentamente, para comprobar que la rejilla está parcialmente abierta, al objeto de evitar que se puedan producir presiones diferenciales excesivas durante las operaciones de vaivén. Al empezar el desarrollo, se baja la tubería de bombeo hasta unos 60 cm sobre el fondo del filtro. Se coloca el tubo de aire de manera que su extremo inferior quede a 30 cm o más por encima del extremo inferior de la tubería de bombeo, y se introduce aire para bombear el pozo, según el método normal de aire comprimido, hasta que el agua quede libre de arena. Seguidamente se procede a cerrar la

válvula entre el depósito y el tubo de aire para permitir que la presión en el depósito ascienda hasta alcanzar de 7 kg/cm<sup>2</sup> a 10.57 kg/cm<sup>2</sup>.

Mientras se baja el tubo del aire hasta que su extremo inferior alcance unos 30 cm por debajo de la tubería de bombeo, se abre rápidamente la válvula para permitir que el aire entre con gran fuerza en el pozo, para formar una oleada que impele con fuerza el agua dentro de la formación a través de las aberturas de la rejilla. Si se levanta el tubo de aire dentro de la tubería de bombeo después de la primera descarga fuerte de aire dentro del pozo, se restablecerá el bombeo, lo que dará una fuerte inversión de caudal que agitará la formación acuífera y de esta manera se completará el ciclo de oleada o vaivén.

Después de un breve periodo de bombeo con aire comprimido, se realiza otra descarga de aire en el tubo de aire en su posición anterior por debajo de la tubería de bombeo, y de nuevo se retira el tubo de aire para bombear otra vez, y así sucesivamente hasta que la ausencia de material fino demuestre que el desarrollo es suficiente.

Seguidamente se levanta la tubería de bombeo unos 60-100 cm continuándose con el procedimiento anterior pero ahora en el nuevo tramo. De esta manera se efectúa el desarrollo a lo largo de la rejilla poco a poco. Una vez concluidas las operaciones, es recomendable poner la tubería de bombeo en su posición original cerca del fondo del pozo, dar una o más descargas de aire y bombear el pozo con el tubo de aire colocado dentro de la tubería de bombeo, para completar el trabajo y dejar el pozo completamente desarrollado.

Cuando se utiliza este método en las debidas condiciones y con el equipo adecuado, resulta

muy eficaz y rápido. Sin embargo, el buen criterio dirá hasta qué punto debe uno seguir con este método de desarrollo.

Cuando el pozo tiene inicialmente un bajo caudal específico o la inmersión es baja, conviene emplear otros métodos de desarrollo. La combinación del pistoneo con el método de pozo abierto es de gran eficacia en los casos en que se desea el máximo de desarrollo en un pozo, si se tiene suficiente inmersión.

#### 5.3.4.2 Desarrollo neumático a pozo cerrado

Consiste en cerrar la parte superior del entubado y disponer el equipo de manera que la presión de aire pueda acumularse dentro del entubado y forzar el agua a través de la rejilla hacia la formación acuífera. Se cierra herméticamente la parte superior del entubado mediante bridas. Se perforan dos agujeros descentrados en la brida superior de cierre, uno grande, con suficiente diámetro para dar paso libre al tubo de descarga, que acaba en una T. En el agujero menor se acopla un tubo pequeño, generalmente de 2.5 cm de diámetro, ver Ilustración 5.6.

La longitud del tubo de descarga será tal que permita tener una inmersión del 60-70 por ciento durante el bombeo, siempre que sea posible. El extremo superior de la T lleva una empaquetadura a través de la cual se baja el tubo de aire hasta quedar a 30 cm o más por encima del extremo inferior del tubo de descarga. El extremo superior del tubo de aire va acoplado a la salida lateral de una válvula de 3 vías. La entrada de esta válvula va acoplada a un tubo de llegada de aire y la salida final va conectada a una T, a una de cuyas bocas se une el tubo pequeño antes citado, mientras la tercera lleva una válvula de aire.

Ilustración 5.6 Compresor de alta presión para desarrollo neumático



Para llevar a cabo el trabajo de desarrollo, primero se sitúa la válvula de tres vías en posición de suministrar aire a la línea de aire y la válvula del tubo corto se mantiene abierta. De este modo se bombeará agua fuera del pozo a través del tubo de descarga, hasta que salga suficientemente clara. Una vez logrado, se detiene el bombeo y se permite que el agua recupere su nivel estático en el pozo. Seguidamente se cierra la válvula del tubo corto y se gira la válvula de tres vías para dirigir el aire comprimido hacia el pozo a través del tubo corto.

Este aire impulsa el agua hacia fuera del entubado a través de la rejilla, agitando de esta manera la formación y rompiendo los puentes de los granos de arena. Al oír escapar el aire por el tubo de descarga, se cierra el paso de aire y se abre la válvula del tubo corto para permitir que el agua alcance de nuevo su nivel. El proceso se repite hasta que el agua salga limpia y quede el pozo totalmente desarrollado. Cuando se utiliza este método se aconseja hacerlo des-

pués de haber limpiado el pozo con la cuchara de la mejor manera posible. Este método resulta muy útil en aquellos casos en los que no se desea realizar un fuerte desarrollo, siendo especialmente útil cuando ya existe una instalación de aire comprimido para el bombeo del pozo. Una limitación al empleo del aire comprimido es la inmersión disponible para el tubo de aire. Se han desarrollado con menos del 60 por ciento de inmersión, incluso con tan solo el 20-25 por ciento pero para ello se requiere más tiempo y mayor habilidad.

### 5.3.5. DESARROLLO DE FORMACIONES ROCOSAS

Los métodos de desarrollo físico que se han comentado son aplicables también a las formaciones rocosas, puesto que remueven los materiales finos que se encuentren obstruyendo, en mayor o menor grado, las fracturas o las cavidades de disolución. Esta es la única posibilidad de desarrollo efectivo de estos métodos, a diferencia del

desarrollo con explosivos, que fractura la roca aumentando el número de vías de acceso del agua.

#### 5.3.5.1 Desarrollo por fracturación hidráulica

Es un método de estimulación en rocas consolidadas duras, muy utilizado en pozos de petróleo y en pozos profundos. Se utiliza poco en pozos de agua de pequeña y moderada profundidad, por ser algo complicado y caro. Además, en estos casos existe el riesgo de producir fracturas verticales que permiten el escape del agua inyectada al exterior, haciendo inútil la operación.

El método consiste en inyectar agua a elevada presión para crear y dilatar fisuras, evitando que se cierren de nuevo mediante la introducción simultánea de arena o bolitas de vidrio. Pero es necesario que el pozo, por encima de la zona que se quiere fracturar esté entubado con una tubería muy resistente y muy bien cementada, pues de lo contrario el agua escapa al exterior o a formaciones suprayacentes. Generalmente, la presión de fracturación es proporcional a la profundidad de la formación a estimular, siendo el factor de proporcionalidad igual o superior a 0.23 atm/m. Al agua de inyección es conveniente que se le añada un gelificante y otros aditivos que le ayuden a aumentar la viscosidad (disminuir el caudal a igual presión).

Las fisuras producidas tienen una anchura de pocos mm y una extensión de varias decenas, o incluso centenas de metros. Cada una de esas fracturas puede aportar una transmisividad de 1 a varias decenas de  $m^2/d$ . Este método sólo se debe aplicar a pozos muy poco productores, ya que de lo contrario no sería posible aumen-

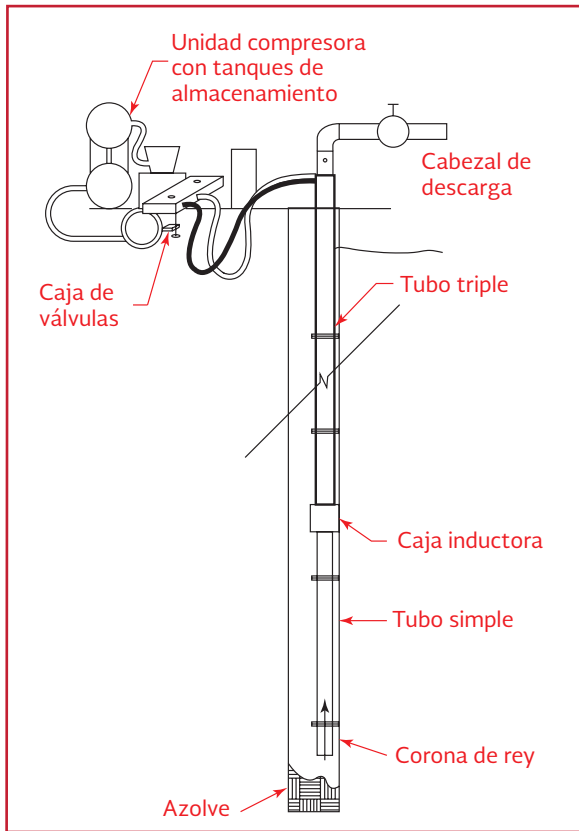
tar suficientemente la presión con las bombas de lodos usuales, y sería preciso recurrir a grandes bombas de alta presión y alto caudal. Existen equipos de inyección montados sobre camiones capaces de proporcionar caudales de algunas decenas de l/s a presiones de más de 500 atm, aunque su alquiler es costoso y el precio del desplazamiento puede ser elevado. En acuíferos calcáreos se recomienda combinar la fracturación hidráulica con la acidificación. Además, si los niveles de agua son profundos, a veces se consiguen fracturaciones locales (rupturas o destaponamientos) con sólo llenar el pozo de agua, ya que ello produce una elevada presión en la base del pozo, ver Ilustración 5.7 y Ilustración 5.8.

#### 5.3.5.2 Desarrollo con explosivos

Su empleo se limita a pozos perforados en roca lo suficientemente estable como para no requerir de ademe o sólo parcialmente, en cuyo caso la explosión se provoca lejos del tubo. Las cargas de explosivo que se emplean pueden variar entre 15 y 50 kg, dependiendo de la roca a fracturar, el diámetro del pozo y la profundidad.

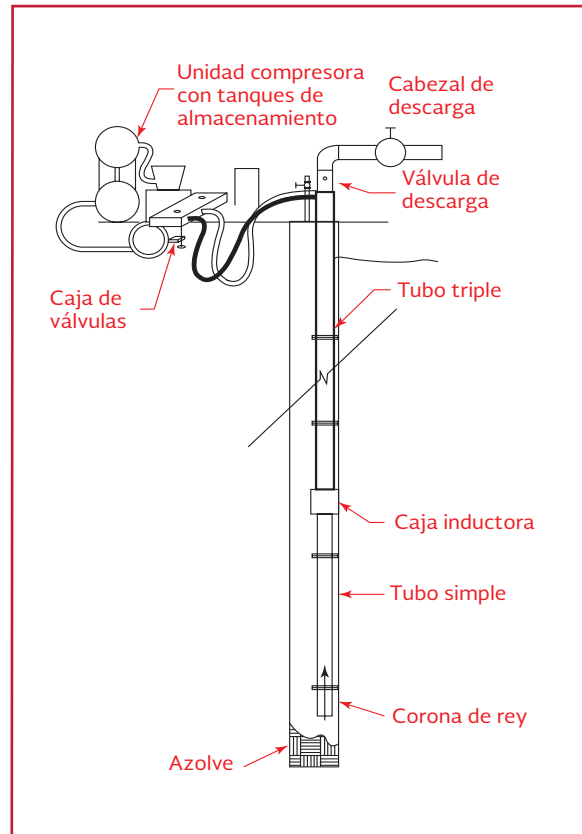
El efecto fisurador de un explosivo en un pozo es en realidad muy limitado y por tanto, salvo casos excepcionales, no se debe considerar como un verdadero método de desarrollo, sino como un modo de producir una facturación inicial, en rocas calcáreas, que facilite la penetración de un tratamiento con ácido. Existen varias fórmulas para tratar de cuantificar en forma aproximada los efectos de una explosión subterránea, pero todas ofrecen cierto grado de incertidumbre, pues hacen intervenir variables que generalmente son desconocidas, como la densidad me-

Ilustración 5.7 Ejemplo desarrollo neumático a pozo abierto



dia de la roca a fracturar o alguna otra constante dependiente de las características de la roca. Por consiguiente, no se abundará más en este tema

Ilustración 5.8 Ejemplo de desarrollo neumático a pozo cerrado



y en caso de necesidad se debe recurrir a la literatura especializada.

**La normatividad mencionada en este capítulo está referida para el año 2014.**

# 6

## AFORO DE POZOS

La prueba de aforo tiene por objeto establecer cuál es el caudal óptimo al que se debe explotar un pozo. Es la operación que culmina la construcción del mismo, pero es también una operación de rutina en la rehabilitación de pozos, ya que, por lo general, los pozos rehabilitados cambian sus condiciones de operación y por consecuencia es necesario conocerlo. En un aforo se pueden diferenciar dos tipos de actividades: las de instalación, operación y desmantelamiento de la bomba, que no se tratan en este manual y los de análisis e interpretación de los resultados de la prueba, que se describen con detalle.

### 6.1. EQUIPO DE BOMBEO

En los aforos se emplean bombas verticales tipo turbina, accionadas por un motor de combustión capaz de variar revoluciones, por lo general entre 900 r/min. y 2000 r/min. La columna debe tener la longitud necesaria para que la bomba no succione aire al abatirse el nivel dinámico. Además de la bomba, se debe contar con un tacómetro de contacto, una sonda, preferentemente eléctrica, con cable suficiente, y un dispositivo de medición de caudal, que consiste, por lo general, en un tubo con orificio calibrado y piezómetro.

Para realizar el aforo, se debe seleccionar una bomba capaz de entregar un caudal del orden del 30 por ciento superiores al esperado para operar el pozo.

### 6.2. PROGRAMA DE AFORO

Al hablar de la selección de un equipo de aforo, se comentó que la bomba debe exceder el caudal esperado y tener columna suficiente; el problema radica en que la prueba de aforo tiene como finalidad establecer dos parámetros básicos: el caudal y el nivel dinámico, que son los mismos con que se escoge la bomba de aforo; por tanto, en primera instancia, el equipo se solicita con base sólo a experiencias anteriores, sean en la región o en el propio pozo. Esta situación se resuelve una vez instalada la bomba, realizando un ensayo de aforo, que se basa en la propiedad de los pozos de alcanzar la mayor parte del abatimiento correspondiente a un caudal dado, durante un tiempo relativamente corto (generalmente una hora puede ser suficiente). Consecuentemente, una vez medido el nivel estático del pozo, se realiza el ensayo, seleccionando cuatro escalones de bombeo, incluyendo el mínimo y máximo caudal que la bomba pueda proporcionar.



Como un ejemplo práctico podrían ser 900 r/min, 1250 r/min, 1600 r/min y 1900 r/min. y bombeando del orden de una hora en cada escalón.

Como resultado del ensayo de aforo se pueden obtener tres conclusiones:

- Con el máximo de revoluciones el nivel dinámico apenas se desplaza, lo que indica que la bomba es insuficiente para el pozo en cuestión y la prueba definitiva no debe realizarse, hasta que se cambie la bomba por otra de mayor capacidad
- Se logra abatir el pozo varios metros; significa que la bomba es adecuada
- El nivel dinámico alcanza la succión de la bomba, lo que se manifiesta en un flujo de agua interrumpido por la expulsión de bocanadas de aire mezclado con agua; significa que el pozo no es capaz de abastecer a la bomba, al menos en ese nivel, o que a ésta le falta más longitud de columna

Una vez terminado el ensayo de bombeo se mide la recuperación del nivel dinámico. Generalmente, se considera que un aforo confiable debe durar unas 72 h, aunque en zonas o pozos bien conocidos puede reducirse a unas 48 horas.

Como ejemplo para un aforo de 48 h se pueden programar escalones a: 900, 1 150, 1 300, 1 450, 1 600, 1 750, y 1 900 r/min, con 7 h de duración cada uno. Para un aforo de de 70 h los mismos escalones de bombeo, pero con duración de 10 h cada uno.

En cada escalón de bombeo se deben tomar lecturas de nivel dinámico, del piezómetro y verifi-

car si se mantienen las revoluciones por minuto, en los intervalos de tiempo mostrados en la Tabla 6.1.

Como el proceso de aforo resulta ininterrumpido, largo y tedioso para el personal de campo, no es raro, sobre todo durante la noche, que se olviden de tomar alguna lectura. Enfatizando que esta situación no debe ocurrir, el personal de campo debe estar consciente de que existe comprensión para alguna omisión, pero no para la invención de datos que no se tomaron, situación que por lo general es fácil de detectar al analizar los registros.

Al terminar el último escalón, a 1900-2000 r/min, se suspende el bombeo y se repite el ciclo de lecturas, pero ahora en forma ascendente, hasta alcanzar la recuperación del nivel estático, momento en que se da por finalizado el trabajo de campo.

### 6.3. INTERPRETACIÓN DE AFORO

Con los datos de las lecturas piezométricas recabadas en campo, el diámetro de la tubería de descarga y el del orificio calibrado, se calcula el caudal para cada escalón de bombeo, utilizando las tablas o fórmulas que se presentan en el Apéndice A y se elabora la gráfica de aforo, donde se representa el caudal en el eje de abscisas y los descensos en el de las ordenadas, preferentemente con escala creciente hacia abajo a partir del nivel estático. Además, se pueden graficar los descensos contra el tiempo para establecer la eficiencia del pozo, según se vio en el Capítulo 1. La gráfica de aforo puede presentar tres formas básicas y una cuarta que es la superposición de dos de las básicas:

Tabla 6.1 Ejemplo de intervalos de tiempo para lecturas en pozos

Num	Tiempo	Num	Tiempo	Num	Tiempo	Num	Tiempo	Num	Tiempo
1	1 min	6	10 min	11	1 h 30 min	16	5 h	17	10 h
2	2 min	7	15 min	12	2 h	17	6 h	18	fin en aforo 48 h
3	4 min	8	20 min	13	2 h 30 min	18	7 h		
4	6 min	9	45 min	14	3 h	19	8 h	18	fin en aforo 70 h
5	8 min	10	1 h	15	4 h	20	9 h		

- La gráfica tiene forma curva con la concavidad hacia abajo (Ilustración 6.1). En principio, la bomba es adecuada a las características del pozo, a reserva de que se haya llegado al caudal óptimo de explotación
- La gráfica tiene forma recta (Ilustración 6.2). En principio, la bomba es de poco caudal con respecto a las características del pozo e incapaz de realizar el aforo. El único dato útil que se deduce de la prueba, es que el pozo en cuestión es capaz de proporcionar mayor caudal que el máximo obtenido en el bombeo

Ilustración 6.1 Curva con posibilidad de calcular el caudal óptimo

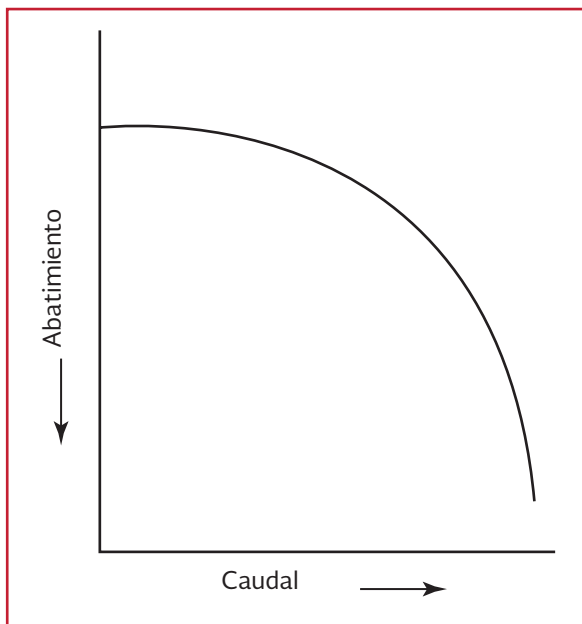
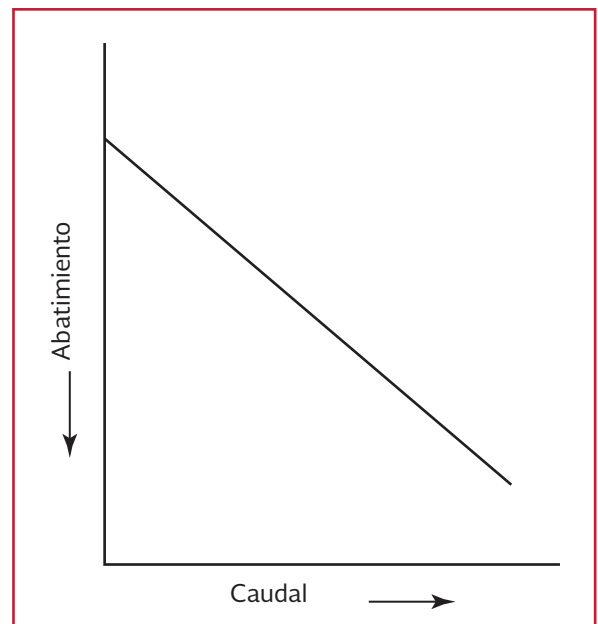
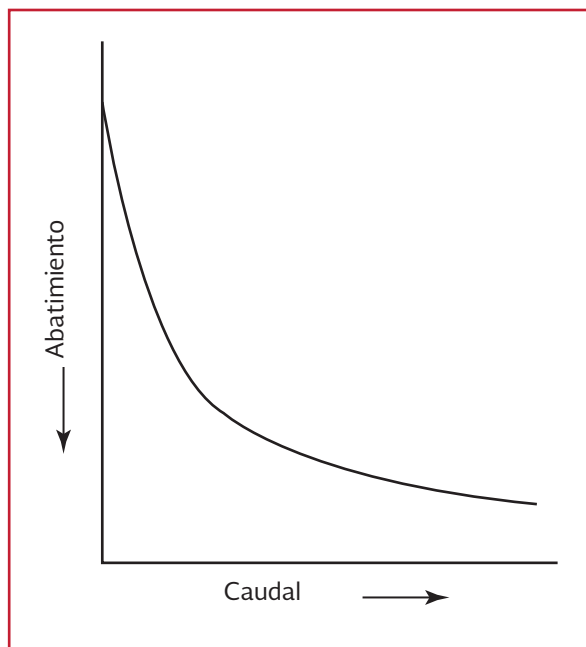


Ilustración 6.2 La gráfica es recta o casi recta. Se está aforando la bomba. Se debe repetir el aforo



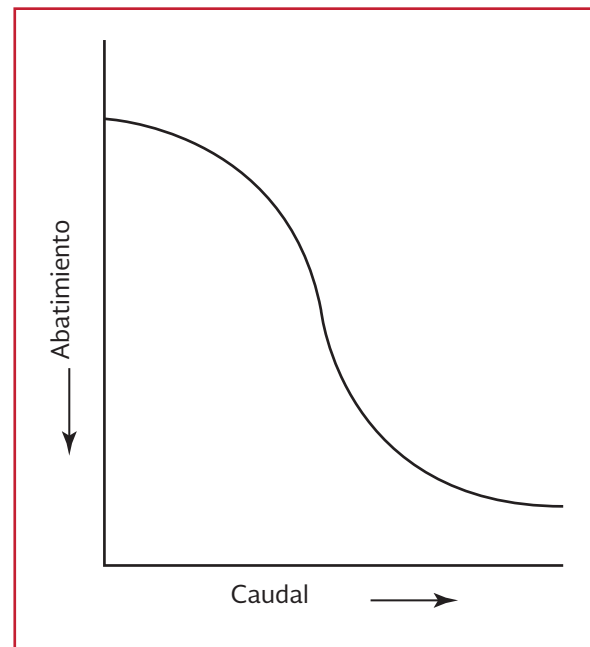
- La gráfica tiene forma curva con la concavidad hacia arriba (Ilustración 6.3). Durante el bombeo el pozo continúa con el proceso de desarrollo y están mejorando sus características hidráulicas. Se debe suspender el aforo y reanudar el proceso de desarrollo, reiniciándolo cuando se tenga la certeza de que esta operación se ha realizado correctamente

Ilustración 6.3 El pozo está en proceso de desarrollo. Se debe repetir el aforo



- Durante un tiempo, la gráfica presenta la concavidad hacia abajo y a partir de cierto momento se invierte hacia arriba (Ilustración 6.4). Esta condición implica que el aforo se había llevado normalmente hasta un momento en que se tomó en un proceso de desarrollo del pozo. Como en el caso anterior, se debe suspender el aforo y completar el desarrollo

Ilustración 6.4 Después de iniciado el aforo, se inició un proceso de desarrollo. Se debe repetir el aforo



### 6.3.1. EL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN

Es aquel caudal que resulta el más conveniente para explotar un pozo. El establecer esta conveniencia depende de condiciones a veces subjetivas; por ejemplo, para una persona que sólo requiere de 5 L/s, aun cuando su pozo fuese capaz de proporcionarle un caudal mayor, su óptimo será de 5 L/s.

En cambio, para un agricultor que cuente con una extensión limitada de tierra susceptible de riego, el caudal óptimo es el máximo que le puede extraer el pozo, aunque quizás tenga la limitante de la profundidad, si su cultivo no resulta económico con bombas que excedan determinado nivel o bien, un sistema de agua potable con escasez de abastecimiento y el consiguiente problema social, para que el costo del bombeo pueda resultar secundario ante las protestas de la ciudadanía;

ante estas alternativas, cada una con matices variados, el establecimiento del caudal óptimo de explotación del pozo considera solo el punto de vista hidráulico y su derivado económico.

### 6.3.1.1 El caudal óptimo de explotación desde el punto de vista hidráulico

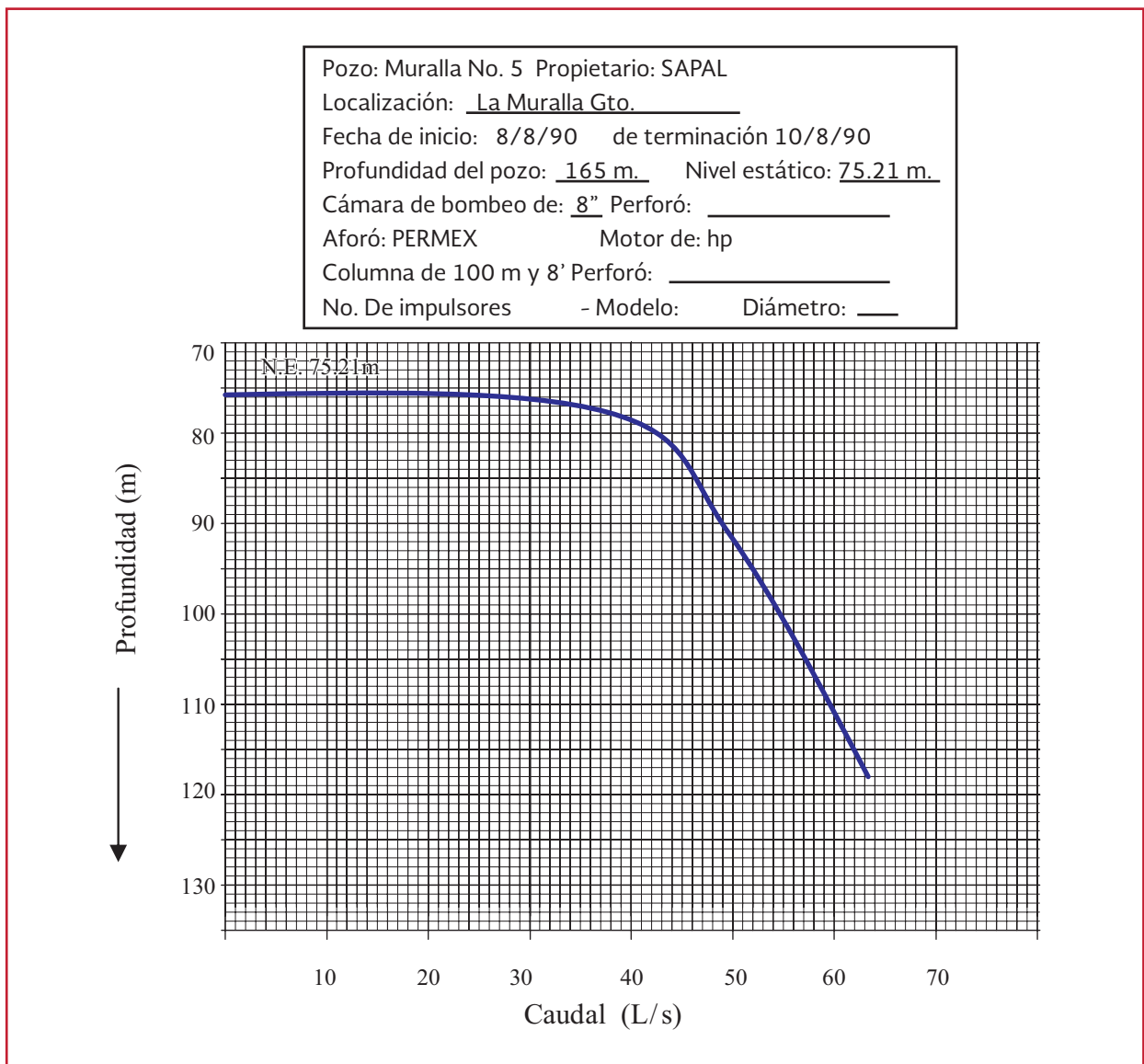
El caudal óptimo de explotación de un pozo, desde el punto de vista hidráulico, se alcanza en aquel punto de la curva de aforo donde el producto del caudal por la capacidad específica es

máximo. Es común escuchar el término "capacidad específica del pozo", como si ésta fuera una característica única para un pozo dado, pero la realidad es que esta variable disminuye al aumentar el caudal del pozo.

De forma práctica, el caudal óptimo se obtiene de la siguiente forma (Villanueva e Iglesias, 1984):

1. Tal como se presentó en el apartado 6.3, del aforo se obtiene una curva como la que se muestra en la Ilustración 6.5

Ilustración 6.5 Ejemplo de curva de aforo y caudal óptimo de explotación



- De esta primer curva se establece, de forma, gráfica la relación abatimiento/caudal, tal como se presenta en la Ilustración 6.6
- En esta gráfica se distinguen dos partes claramente identificables: el primer tramo OA puede considerarse como una representación casi lineal, donde la relación abatimiento/caudal mantiene una cierta proporcionalidad

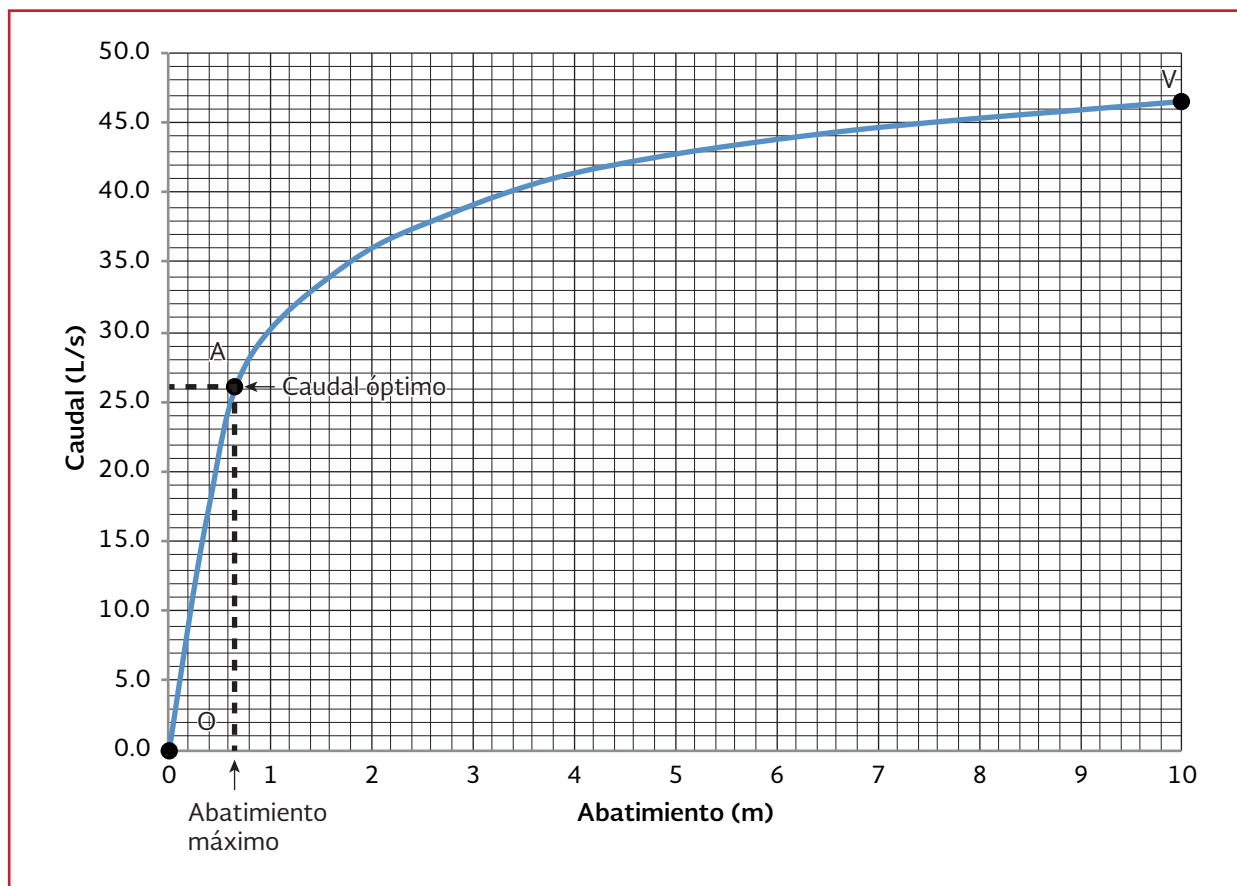
Esto se interpreta como que el pozo aporta poco caudal durante un cierto intervalo de caudales, pero con bajos descensos del nivel de bombeo, sin embargo, esta agua resulta "barata", pues consume poca energía para bombear un caudal dado

Para abatimientos importantes, la pendiente de la curva es cada vez mayor y aumenta rápidamente (Tramo AV)

- El punto A de la curva característica a partir del cual un incremento pequeño de caudal provoca un aumento considerable de abatimiento, se denomina punto crítico y para este ejemplo el caudal óptimo resulta de  $Q_{opt} = 26 \text{ L/s}$ , para un abatimiento de 0.65 metros

A partir del punto crítico de la curva (el que cumple la definición de caudal óptimo), pequeños incrementos de caudal significan grandes aumentos en el nivel de bombeo; de manera que esta agua, más abundante, es también más "cara". El caudal óptimo de explotación es aquel en que estas dos situaciones contrapuestas se equilibran de manera racional.

Ilustración 6.6 Curva abatimiento/caudal



### 6.3.1.2 El caudal óptimo de explotación desde el punto de vista económico

El caudal óptimo hidráulico toma en cuenta únicamente el aspecto de su operación en función del consumo energético, que evidentemente es importante en el rubro de gastos de operación, pero existen otros aspectos íntimamente ligados a condiciones económicas, variables de país a país y aun de región a región, que se exponen en forma simplificada a modo de ejemplo, pero que cada especialista puede afinar, dependiendo de la información de que disponga y su propia organización administrativa.

Para comprender la aplicación del sistema, a continuación se da un ejemplo donde los costos fijos se obtienen en la Tabla 6.2 y Tabla 6.3, con las variables del aforo que se presentan en la Tabla 6.1.

- **Costos fijos.** Se propone bajo esta denominación aquellos costos que se tienen, aun cuando el pozo se encuentre fuera de operación; básicamente los aspectos de depreciación, inversión, seguros y mantenimiento, de pozo, bomba, y obra civil, además de los sueldos del personal y todos los demás costos fijos que se puedan determinar. Estos costos se convierten a costos horarios, por el sistema usual en cualquier análisis de precios unitarios, aplicando a cada uno de los elementos una vida económica y horas anuales

de operación razonables (Tabla 6.2) Estos costos horarios se agrupan en un "Costo Fijo" horario (Tabla 6.3)

- **Costos variables.** Son aquellos que se generan durante la explotación del pozo y que por tanto están afectados por la operación del mismo

En una misma curva de aforo, a cada caudal corresponde un cierto nivel dinámico y por consiguiente unos kW consumidos, con su costo correspondiente. De esta manera, a cada caudal de explotación corresponde un Costo Total que agrupa al fijo más el variable (Tabla 6.3). Se llama "Eficiencia Económica" a la relación entre el costo horario total sobre el caudal bombeado y "Caudal óptimo económico de explotación" al punto en el que el valor de la Eficiencia económica sea mínimo. Los datos calculados se presentan en dos gráficas (Ilustración 6.7 y Ilustración 6.8), en la primera aparece el caudal en las abscisas, contra el costo total por hora de operación en las ordenadas. Si se traza desde el origen, una serie de rectas que corten la curva, se encuentra que la de mínima pendiente es la única tangente a la curva y el punto de tangencia corresponde al caudal óptimo económico. En la Ilustración 6.8 se representa el caudal en el eje de las abscisas contra el costo horario total, dividido entre el caudal correspondiente en las ordenadas, en este caso la curva debe presentar forma de cuna y el punto de menor ordenada señala el óptimo económico del pozo, que coincide en las dos gráficas.

Tabla 6.2 Ejemplo de análisis costo por año de maquina

Maquina: Bomba muralla 5		Modelo: H.P.		Clave:	
Capacidad:		Datos adicionales:			
Datos generales					
Precio de adquisición (Va)	\$200 000.00	Motor eléctrico		0 kWh	
Equipo adicional	\$0	Factor de operación		80 %	
Valor llantas (VII)	\$0	Pot. Operac. Diésel (POD)		0 H.P.	
Valor inicial (Va)	\$200 000.00	Pot. Operac. Gasolina (POG)		0 H.P.	
Valor rescate (Vr) (%)	\$0	Pot. Operac. Eléctrico (POE)		0 H.P.	
Vida Económica (Vc)	15	Precio litro de diésel (Pc)		\$455	
Tasa de interés anual (i)	20%	Precio litro de gasolina (Pc)		\$500	
Horas anuales (Ha)	4 500 h/año	Precio de kWh		\$300	
Prima anual seguro (s)	0 %	Capacidad del Carter (C)		10 l	
Factor de mantenimiento mayor (Q)	50 %	Tiempo/cambio de Aceite (t)		100 l	
Factor de mantenimiento menor (q)	10%	Precio del aceite (\$)		\$3 000	
Motor diésel	0 H.P.	Vida económica Llantas (Hv)		3 000 h	
Motor gasolina	0 H.P.				
I.-cargos fijos					
Depreciación	$D=(Va-Vr)/(Ve * Ha)$			\$2.963	
Inversión	$I= (Va +Vr)i/2Ha$			\$4.444	
Seguros	$S= (Va+ Vr)s/2Ha$			\$0	
Mantenimiento	$T=Q*D$			\$1.481	
	Suma cargos fijos anual			\$8.889	
II.- cargos por consumo					
Combustible	$E=C*Pc$				
	Diésel: $E= 0.1514*POD*Pc$			\$0	
	Gasolina $E= 0.2271*POD*Pc$			\$0	
Energía eléctrica	$E=0.746 *POE *Pc$			\$0	
Lubricantes	Diésel: $L=((C/f)+0.0035*POD*Pa)$			\$0	
	Gasolina : $L= ((C/f)+ 0.0030*POG*Pa)$				
Llantas	$LI= VII/Hv$				
Mantenimiento menor	$Mm=q*D$				
Otros consumos (Desperdicios, herramienta, estopa, grasa, etcétera) Oc=suma *10 %				\$0	
	Suma car. Consumo. Hora			\$0	
III.- Cargos por operación					
	Turno	Factor rendimiento salario	1.572	\$15 000	
	Turno	Horas por turno	8	\$0	
	Turno	Cargo salario=salario/turno*Fec.Sal/(h/turno)		\$0	
	Turno	Suma		\$15 000	
		Suma cargos mano obra		\$2 948	
		Suma cargos horarios	\$11 836		
Maq.trab.indirectos 28 %		\$3 314	Utilidad 10 %	\$1 184	
Maq.parada.indirectos 28 %		\$3 314	Utilidad 10 %	\$1 184	
H.maq.trabaj precio		\$16 334	Costo directo	\$11 836	

Tabla 6.3 Ejemplo de tabla de eficiencia económica

Caudal	Caudal	Nivel Dinámico	hp	kWh	Costo Variable	Costo Total	Eficiencia
l/s	m³/h	m			\$/h	\$/h	\$/Q
0	0	75.21	0	0	\$0	\$19 180	\$0
5	18	75.28	27	20	\$3 068	\$22 248	\$1,236
10	36	75.47	55	41	\$6 152	\$25 332	\$704
15	54	75.61	83	62	\$9 245	\$28 425	\$526
20	72	75.81	110	82	\$12 359	\$31 539	\$438
25	90	76.06	139	103	\$15 500	\$34 680	\$385
30	108	76.27	167	124	\$18 651	\$37 831	\$350
35	126	76.76	196	146	\$21 899	\$41 079	5326
40	144	77.74	227	169	\$25 348	\$44 528	\$309
45	162	78.86	259	193	\$28 927	\$48 107	\$297
50	180	80.68	294	219	\$32 883	552 063	\$289
55	198	90.71	364	271	\$40 668	\$59 848	\$302
60	216	105.51	461	344	\$51 603	\$70 783	\$328
65	234	120.00	568	424	\$63 581	\$82 761	\$354

Ilustración 6.7 Costo total -caudal

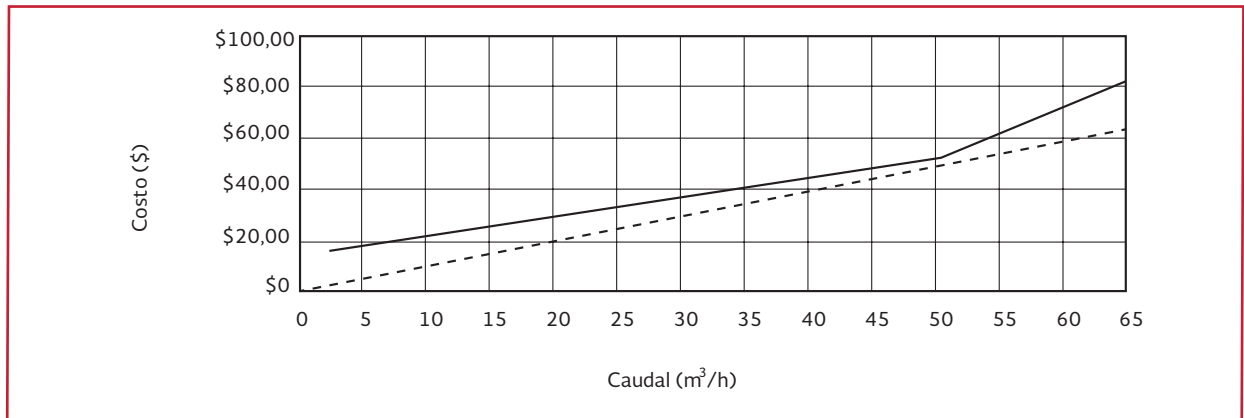
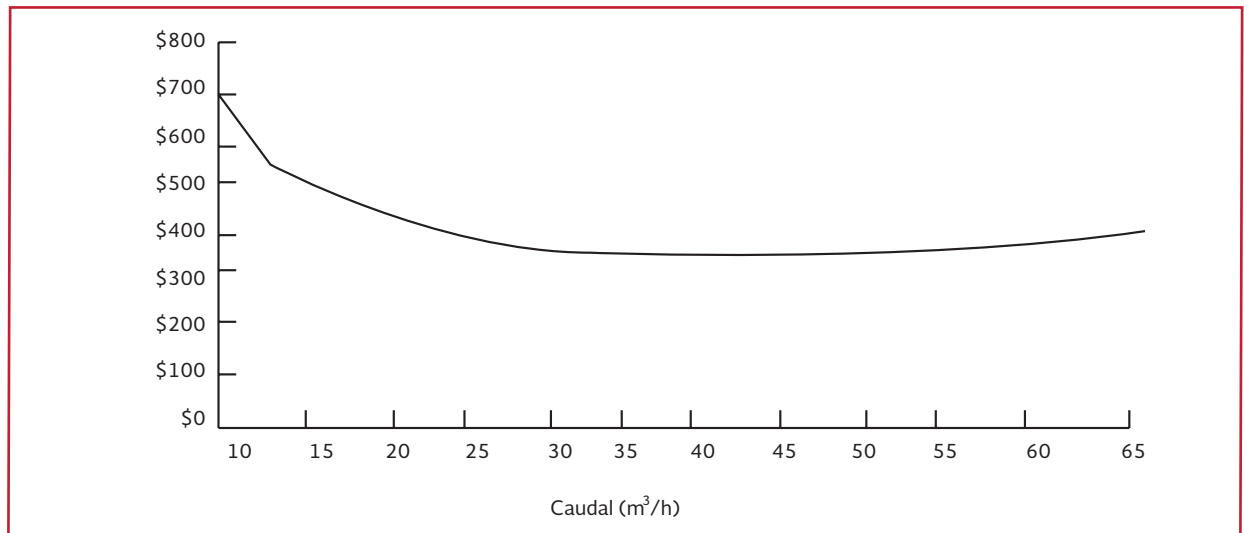


Ilustración 6.8 Eficiencia económica-caudal





## 6.4. CÁLCULO DE LA TRANSMISIVIDAD DEL ACUÍFERO A PARTIR DE LA RECUPERACIÓN DEL POZO

Para conocer el funcionamiento de un acuífero y planear su explotación racional, es indispensable conocer dos parámetros esenciales: el Coeficiente de Almacenamiento y la Transmisividad. Estos dos parámetros se establecen a partir de pruebas de bombeo, preferentemente aplicando alguno de los métodos de variación. Estas pruebas requieren, además de un pozo de bombeo, de al menos un piezómetro, (aunque se recomiendan de dos a cuatro), donde se lean los descensos provocados por el bombeo. Esta condición se da raras veces, por lo que tampoco es frecuente conocer el funcionamiento de los acuíferos. Se define la transmisividad como la cantidad de m<sup>3</sup> de agua, que a una temperatura de 20 °C, atraviesa durante un día, una faja de acuífero de altura metros igual a la del acuífero y de un metro de ancho, bajo un gradiente unitario (Lm/Lm).

También se define como el producto de la permeabilidad media del acuífero por su espesor, bajo las mismas condiciones antes determinadas.

$$T = Km \quad \text{Ecuación 6.1}$$

donde:

$T$  = Transmisividad en metros cuadrados por día (m<sup>2</sup>/d)

$K$  = Coeficiente de permeabilidad en metros por día (m/d)  
 $m$  = Espesor medio del acuífero en metros (m)

La transmisividad se puede calcular en forma aproximada, aun cuando no exista pozo de observación, mediante la medición de la recuperación en el propio pozo de bombeo, aplicando la fórmula simplificada de Jacob. El método se utiliza con base en mediciones de campo hechas durante una prueba de bombeo.

$$T = 0.1832 \frac{Q}{S_2 - S_1} \quad \text{Ecuación 6.2}$$

donde:

$T$  = Transmisividad en metros cuadrados por día (m<sup>2</sup>/d)  
 $Q$  = Caudal del último escalón de bombeo en metros cúbicos por día (m<sup>3</sup>/d)  
 $S_2 - S_1$  = Diferencia de nivel durante un ciclo logarítmico, en la porción de la gráfica en que ésta se adapta a una recta

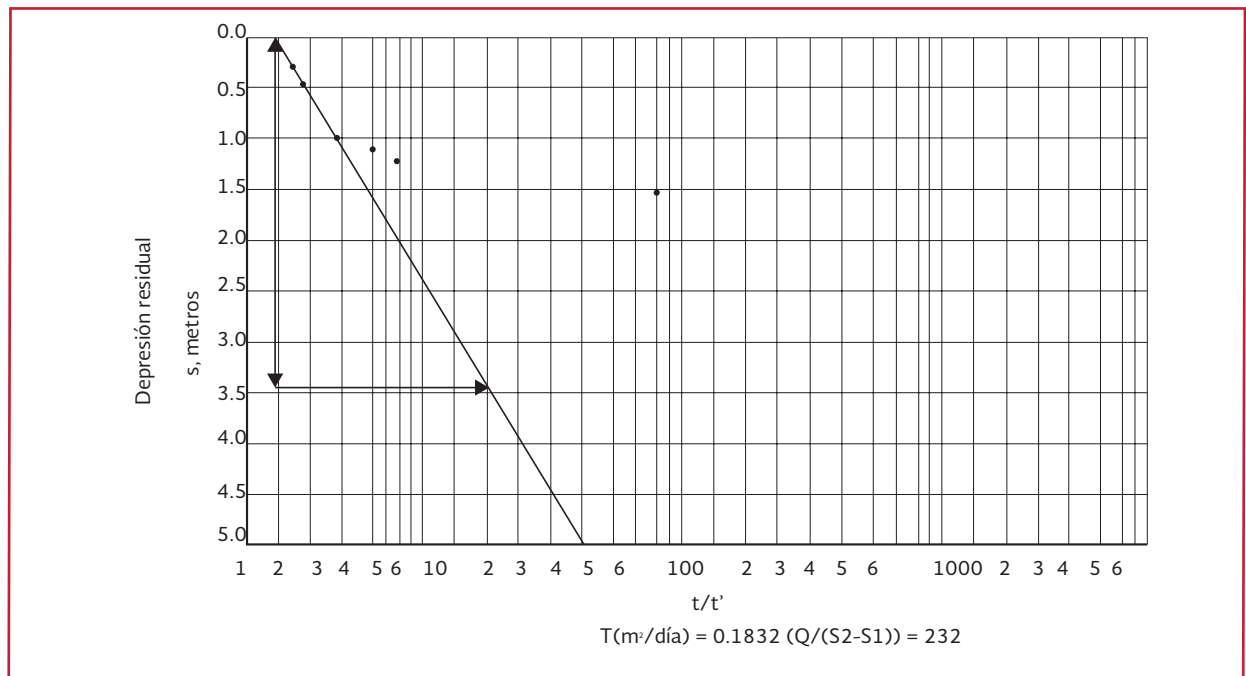
La aplicación de la fórmula de Jacob requiere conocer la diferencia de nivel durante un ciclo logarítmico que se obtiene graficando en un papel semilogarítmico el tiempo en el eje logarítmico, contra el ascenso en el eje normal (Tabla 6.4 e Ilustración 6.9).

**La normatividad mencionada en este capítulo está referida para el año 2014.**

Tabla 6.4 Ejemplo del cálculo de transmisividad a partir de la recuperación del pozo (método de Jacob)

Fecha:	Pozo: muralla 5		Municipio:	
Prueba no.	Estado:		Localización:	
Propietario:	Responsable:		Cuadrilla No:	
$q$ (l/s): 51.3	$q$ (m <sup>3</sup> /día): 4432.32		Nivel estático (m): 99.33	
Tiempo desde que se inició el bombeo, $t$	Tiempo desde que se detuvo el bombeo, $t'$	$t/t'$	Nivel dinámico	Depresión residual, $s'$
minutos	minutos		m	metros
30.0				
30.5	0.50	61.00	100.87	1.54
35.3	5.30	6.66	100.46	1.13
37.5	7.50	5.00	100.39	1.06
40.0	10.00	4.00	100.28	0.95
50.0	20.00	2.50	99.66	0.33
55.0	25.00	2.20	99.50	0.17
60.0	30.00	2.00	99.33	0.00

Ilustración 6.9 Transmisividad a partir de la recuperación del pozo (método de Jacob)





# 7

## HERRAMIENTAS DE PESCA

En el vocabulario de la perforación de pozos, se llaman "operaciones de pesca" a aquellas tendientes a extraer desde el pozo hasta la superficie, cualquier material indeseable que se encuentre en su interior. Por extensión, en el mantenimiento y rehabilitación de pozos se emplea la misma terminología, si bien el tipo de objetos que se pescan en una y otra actividad difieren, pues mientras que en la perforación lo usual es extraer la propia herramienta de perforación, en la rehabilitación, por lo general, se pescan bombas y objetos que por descuido o accidente caen dentro del pozo.

### 7.1. TIPOS DE HERRAMIENTAS

El tipo de herramienta que se utiliza para una pesca es muy variado, pues depende del tipo de objeto de que se trate, de la experiencia, preferencia y recursos propios de cada operador, por lo que resulta poco práctico el pretender dar reglas o "recetas" al respecto, con excepción de las que siguen, que resultan de aplicación general a cualquier maniobra de pesca:

- No iniciar ninguna maniobra de pesca antes de tener toda la información posible al respecto, como geometría del pes-

cado, situación en el pozo, peso aproximado, está libre o aprisionado, etcétera

- Organizar detenidamente las maniobras requeridas para la pesca en el orden correspondiente y verificar si cuenta con el equipo y materiales necesarios, en caso negativo obtenerlos antes de iniciar la operación
- Repasar toda la estrategia de pesca varias veces y si no se encuentran fallas ni posibles mejoras, se puede iniciar la pesca

Las herramientas a utilizar son también muy variadas y en muchos casos construidas en campo, por lo que sólo se citan las más usadas en máquinas de percusión y fabricadas por casi todas las firmas especializadas.

#### 7.1.1. PORTA CABLE RÍGIDO

Para realizar las labores de pesca se emplea un porta cable rígido, en lugar del giratorio, usado para perforar, ya que con él no existe variación en la longitud del cable, como sucede con el portacable giratorio. Como la precisión es muy importante en las maniobras de pesca, se deben cuidar todos los detalles, de ahí la necesidad de tener en cuenta que un error de unos pocos centímetros puede estropear una maniobra de

pesca. Si no se cuenta con un portacable rígido, se puede utilizar el giratorio, pero introduciendo un trozo de madera que acuñe la bala, con lo que se evita su juego.

### 7.1.2. BARRETÓN DE PESCA

El barretón (Ilustración 7.1 a) de pesca es más corto y ligero que el normal utilizado en la perforación. Se utiliza debajo del portacable y encima de las tijeras de pesca.

### 7.1.3. TIJERAS DE PESCA

Son iguales que las tijeras de perforación, pero su carrera es más larga (Ilustración 7.1 b), de manera que excede el desplazamiento de la biela. La finalidad de esta característica es que al golpear hacia arriba no se aplique un golpe hacia abajo al mismo tiempo, pues si se pega en ambos sentidos existe una gran probabilidad de que la pesca se desenganche. Esta misma condición es aplicable al golpe hacia abajo. Las tijeras de perforar, en cambio, se utilizan para soltar la herramienta que quedó atrapada, condición en que es muy conveniente el golpear simultáneamente en los dos sentidos, razón por la que su carrera es menor o cuando mucho igual a la de la biela.

### 7.1.4. CORTA CABLE

Cuando las herramientas están tan atascadas en el pozo y no se pueden soltar con el golpeador, se tiene que cortar el cable lo más cerca posible del portacable, para intentar después una pesca con campana.

El cortador de cable completo (Ilustración 7.1 c), comprende de portacable rígido, un barretón, tijera de pesca y corta cable, manejado con el cable de cuchara.

Para operar, se quita la tapa del cortador, las cuchillas y los pasadores y se arma alrededor del cable, pero sin poner las cuchillas. Se tensa el cable que se ha de cortar.

Se baja el cortador comprobando que corra por el cable libremente hasta el portacable, se sube y se le agregan las cuchillas limpias y bien engrasadas, se baja otra vez hasta el portacable. La acción de corte se realiza golpeando hacia arriba sucesivamente

### 7.1.5. GOLPEADOR

Se utiliza para soltar herramientas que se han acuñado (Ilustración 7.2 a). Esto suele ocurrir cuando se perfora sin tijeras, pues es más fácil que se atore la herramienta, sin tener el impulso extra que otorgan las tijeras. El golpeador se suspende del cable de la cuchara y el cable de perforación sirve como guía. Para impedir que se enreden los cables de cuchareo y de perforación, se debe tensar este último antes de descender el golpeador, que de preferencia no se debe bajar de una sola vez sino en varios tramos. Una vez que ha tocado el cuello del portacable, se sube unos 3 a 5 metros, para luego dejarse caer libremente, por lo común unos cuantos golpes aflojan la herramienta, exceptuando en algunas ocasiones en que la herramienta está atrapada por algún caído.

Si por algún desprendimiento, se atascan las tijeras, pueden desatorarse utilizando un método análogo, pero aplicando menos tensión al cable de perforación y dejando el freno del malacate de perforación apretado ligeramente.

Si no se dispone de corta cable, el golpeador puede cortar el cable del portacable, dejando a este cable un poco flojo, y golpeando sucesiva-

mente unas 10 o 12 veces desde una altura de 3 metros, a continuación se le dan tirones sucesivos, hasta que el cable se rompe de la parte machacada por el golpeador.

### 7.1.6. CAMPANA DE FRICCIÓN

La forma de pescar, cuando se desenrosca o rompe la rosca de una broca, es con una campana de fricción (Ilustración 7.2 b). No se debe intentar pescarlo a la primera, sino golpear un poco hacia abajo y después golpear la campana para ver las señales que la broca deja en ella. Si

se observa que la broca ha entrado en la campana, se golpea más fuerte hasta que se atore, y se comienza a subir. Hay que recordar que esta unión es debida solo a la fricción, por lo que no aguanta muchos golpes hacia arriba.

Si al golpear la broca se observa en la campana que no entra dentro de ella, quiere decir que se está golpeando de lado, ocasionando enterarla más, por lo que hay que suspender esta operación y bajar una costilla para enderezarla, y después poder continuar con la campana de fricción.

Ilustración 7.1 Herramienta de pesca (Parte 1)

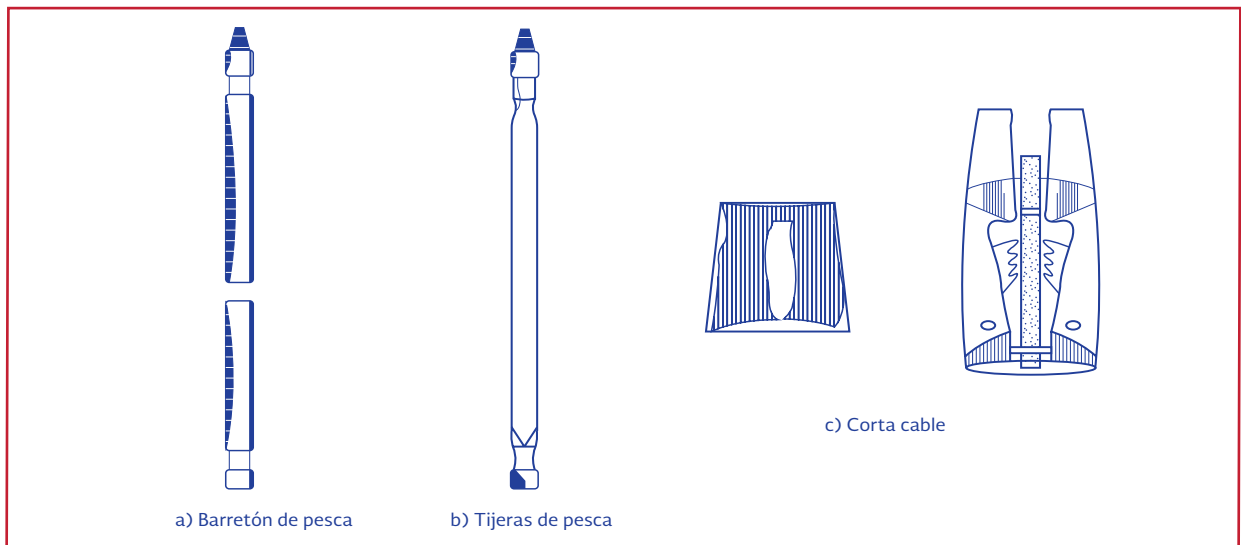
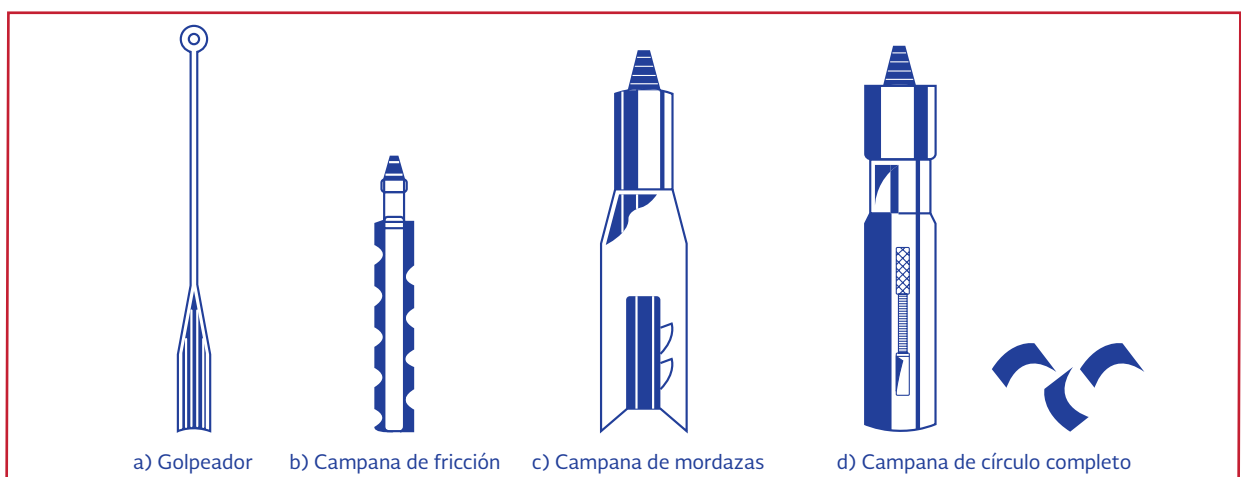


Ilustración 7.2 Herramienta de pesca (Parte 2)



### 7.1.7. CAMPANA CON MORDAZAS

Sirve para pescar el cuello de un portacable después de que se ha cortado el cable. También se puede utilizar para pescar la rosca macho de cualquier herramienta, o cualquier objeto cilíndrico, como son el barretón de perforación o la tubería, que esté en posición vertical, con la condición que el diámetro sea 0.5 cm menor que el interior de la campana. Las cuñas son de dos tipos: cónicas que sirven para pescar roscas, y cilíndricas para pescar cuellos de portacable y objetos cilíndricos, teniendo distintos tamaños para cada pieza que se quiera pescar.

Esta herramienta (Ilustración 7.2 c) es sumamente efectiva, y es muy difícil que ésta se desprenda, una vez realizada la pesca, por lo que antes de pescarla, es necesario asegurarse de que la herramienta a pescar no esté acuñada de tal forma que sea imposible sacarla. Para las operaciones con la campana de mordaza se utilizan las tijeras de pesca, y el golpe más corto de la máquina.

Se baja la campana lentamente hasta alcanzar la pesca, dándole unos cuantos golpes hacia abajo para hacer el enganche. Si no sale, hay que golpear hacia arriba, es conveniente golpear corto y rápido, esta acción puede durar algunas horas. Si no queda libre se puede dar un golpe más largo y fuerte. Si no se puede soltar la herramienta, lo único que queda por hacer es desenganchar la campana, golpeando en los dos sentidos simultáneamente. Si se suelta en pocos minutos no se dañará la campana, pero frecuentemente puede tardar más tiempo en soltar, con graves daños a ésta.

Después de terminar la pesca, se desengancha la campana, desarmándola y limpiándola para tenerla lista cuando sea necesario.

### 7.1.8. CAMPANA DE CÍRCULO COMPLETO

La campana de círculo completo (Ilustración 7.2 d) sirve para realizar pescas de cuellos de barretón, tijeras, brocas u objetos cilíndricos en posición vertical. Su uso y procedimiento de pesca es igual al de la campana de mordazas, tomando las mismas precauciones.

### 7.1.9. COSTILLA

Esta herramienta (Ilustración 7.3 a) sirve para enderezar brocas o herramientas recargadas sobre la pared, de manera que no puedan ser pescadas por una campana. También puede desacuñar una barra. La manera de utilizarla es bajándola hasta que esté al lado de la pesca, y entonces golpear con la máquina simultáneamente arriba y abajo. Después de 20 o 30 minutos, se quita la costilla y se hace un intento por pescar.

Si este método no da resultado, hay que colocar la costilla encima de ella, y se hace descender toda su longitud entre la pared y el pescado. Se pone en movimiento golpeando arriba y abajo, abriendo así un hueco entre la herramienta y la pared, para poder introducir más fácilmente la campana.

### 7.1.10. GANCHO CENTRADOR (MANO DE DIABLO)

Se utiliza para poner en pie herramientas que estén apoyadas en la pared y no se puedan enderezar con la costilla (Ilustración 7.3 b). Se puede utilizar un portacable giratorio o tubería en lugar de cable.

Se baja el gancho hasta que se encuentre a un lado del objeto a pescar, y se sube muy despacio,

hasta llegar a la parte superior de la herramienta perdida. A continuación se arroja al pozo escoria, carbón u otro material blando para evitar que la herramienta se vuelva a acostar en la pared.

#### 7.1.11. PESCANTE DE CUCHARAS

Esta herramienta (Ilustración 7.3 c) se utiliza para pescar cucharas que han quedado en el pozo con poco o nada de cable sobre ellas. El pestillo abre hacia arriba para permitir la entrada del asa de la cuchara dentro de la horquilla del pescante, pero no lo hace hacia abajo, con lo que se logra la pesca de la cuchara.

#### 7.1.12. PESCACABLE

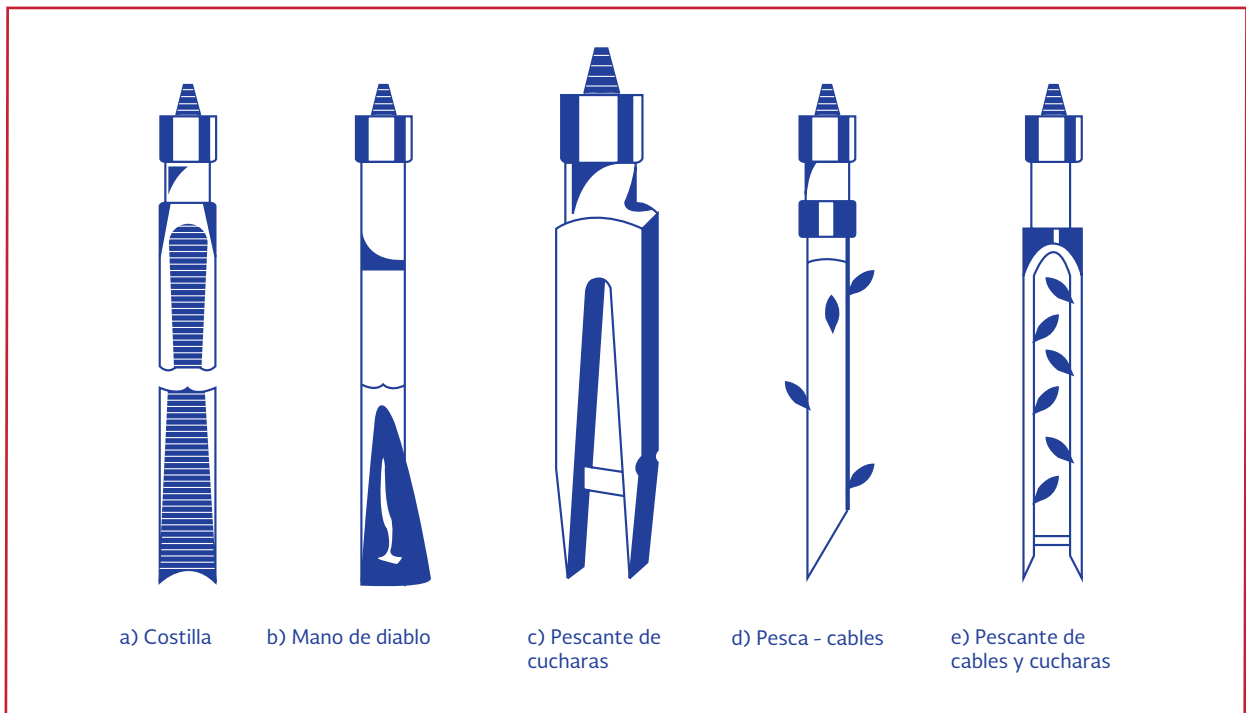
Se utiliza para pescar herramientas unidas a una cantidad más o menos grande de cable (Ilustración 7.3 d), el cual se enreda en los ganchos de que va provisto el pescante.

#### 7.1.13. ARPÓN PESCACABLE CON PESTILLO

Se trata de una herramienta híbrida de las dos que se acaban de describir (Ilustración 7.3 e), que se utiliza cuando se rompe el cable de perforación y queda la herramienta con cable encima. También se utiliza si se rompe el cable de una cuchara. Se mide el cable desde el punto que corresponde al nivel del suelo hasta el extremo y tomando en cuenta la longitud de la herramienta y la profundidad del sondeo, se determina la cantidad de cable que quedó en el interior.

Si la cuchara quedó con poco cable, puede ser pescada por el asa con el pestillo de la parte inferior de este pescador. Debe cuidarse que no baje tanto y pueda atorarse con las tijeras, complicando la pesca. Para evitar esto, es conveniente que el pescador lleve un disco de madera de diámetro aproximado al del sondeo.

Ilustración 7.3 Herramienta de pesca (Parte 3)





Debe comprobarse que al enganchar con el arpón, quede bien fijo, esto se hace subiendo la pesca unos 5 ó 6 metros y aplicando ligeramente el freno de tambor, para que si la pesca no está bien enganchada, ésta se suelte desde poca altura, lo que es preferible a que ocurra de una altura mayor. Si las herramientas están atascadas, habrá que ir sacando el cable a pequeños trozos.

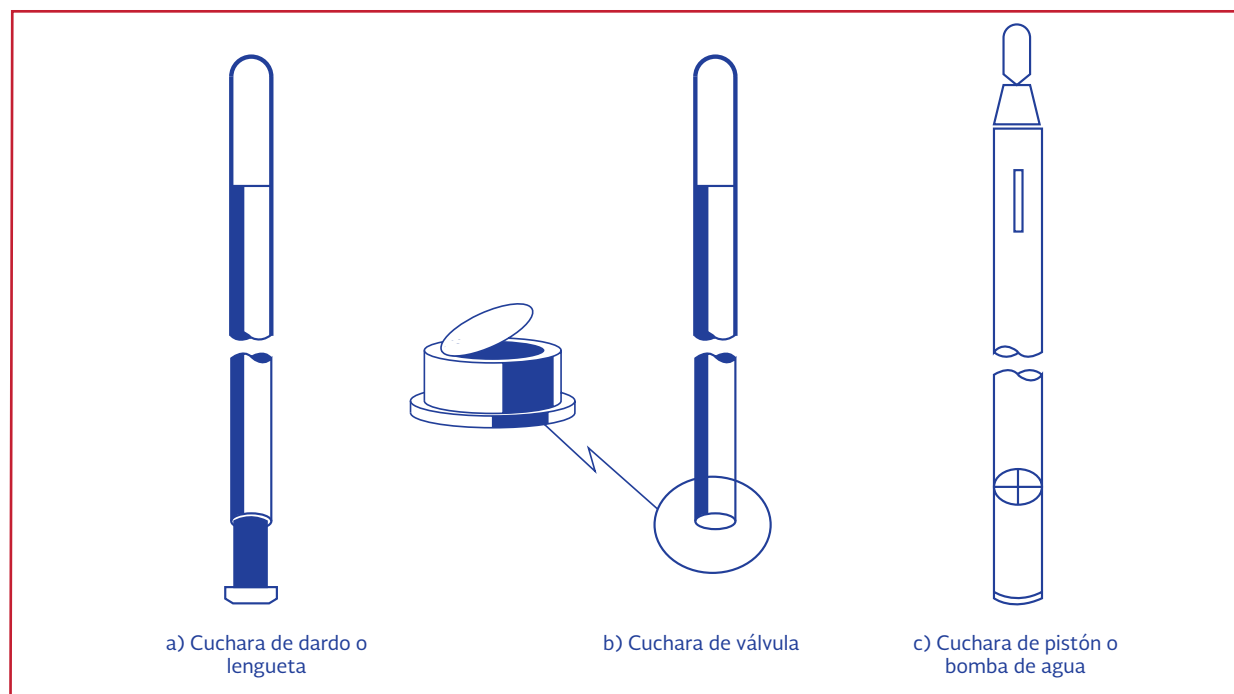
#### 7.1.14. CUCHARAS

Aunque la cuchara no es en realidad una herramienta de pesca, se incluye en este capítulo en vista de que su uso es constante en trabajos

de rehabilitación de pozos. Las cucharas más usuales son la de dardo (Ilustración 7.4 a) y la de válvula (Ilustración 7.4 b), cuya diferencia estriba sólo en el tipo de cierre que permite la entrada e impide la salida del material "cucharado", el cual previamente debe encontrarse en suspensión para poder penetrar al interior de la cuchara. La cuchara de pistón (Ilustración 7.4 c), también conocida como bomba de arena, introduce el material a su interior por la succión que provoca un émbolo que se acciona desde la superficie mediante un cable. Resulta muy práctica para extraer materiales gruesos como la arena e incluso gravilla.

***La normatividad mencionada en este capítulo está referida para el año 2014.***

Ilustración 7.4 Herramienta de pesca (Parte 4)



# 8

## MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DEL POZO

En la construcción de un pozo interviene un número reducido de materiales, número que se reduce aún más al tratar de la rehabilitación, en la que se llegan a utilizar solamente filtro granular, ademes y algunos productos químicos, como los dispersantes de arcillas, cloro, o ácidos. En este capítulo se comenta lo referente al filtro y el ademe.

### 8.1. EL FILTRO GRANULAR

La presencia de arena en los pozos es uno de los problemas más frecuentes que se presentan, en la mayoría de los casos debido a un mal diseño, construcción deficiente o ambas causas ver Ilustración 8.1. Una solución temporal a la presencia de arena consiste en un desarrollo energético del pozo, que penetre lo más profundamente posible en el acuífero, dejándolo limpio de arena, pero dado que no se han modificado las condiciones defectuosas originales, el pozo volverá

Ilustración 8.1 Filtro de granular



a producir finos, aunque si el tratamiento es lo suficientemente profundo, puede permitir varios años de operación normal, antes de requerir una nueva rehabilitación.

Para remediar en forma definitiva el problema, en la rehabilitación se debe realizar lo que debió hacerse al construirlo, o sea, colocar un cedazo y filtro granular adecuados a la granulometría del acuífero, lo que sólo puede lograrse instalando en el interior de la obra un nuevo cedazo y filtro granular diseñados en función de la granulometría del azolve extraído del pozo. Lo anterior limita esta solución a pozos con ademes de grandes diámetros, pues el nuevo cedazo y filtro lo reducen en 15.24 cm (6") como mínimo, lo que implica cambiar a una bomba de menor diámetro y por tanto de menor caudal. En resumen, esta posibilidad depende de las características geométricas del pozo y de los requerimientos de explotación. Por otra parte, los nuevos elementos colocados implican pérdidas de carga adicionales y por tanto, una baja en la capacidad específica del pozo.

Ilustración 8.2 Cedazos para análisis granulométrico

### 8.1.1. GRÁFICA GRANULOMÉTRICA

Para calcular el filtro granular que requiere un pozo, es necesario, como primer paso, obtener una muestra del material que se pretende filtrar y a partir de ésta, elaborar la curva granulométrica acumulativa. En la rehabilitación de un pozo productor de sólidos se muestrea el material de azolve en el pozo, que no pudieron detener el cedazo y el filtro original.

La muestra seleccionada se pesa y se hace pasar por un juego de cedazos de distintas aberturas, dispuestas de mayor a menor abertura (Ilustración 8.2), pesándose el material retenido por cada malla y calculando el porcentaje de retención parcial con respecto al peso total. Después se calcula el porcentaje acumulado que pasa, restando del 100 por ciento, la sumatoria de la retención parcial de cada una de las mallas anteriores, y a continuación se gráfica en un papel semilogarítmico el porcentaje acumulado que pasa en el eje de escala normal y la abertura de la malla en el eje logarítmico.



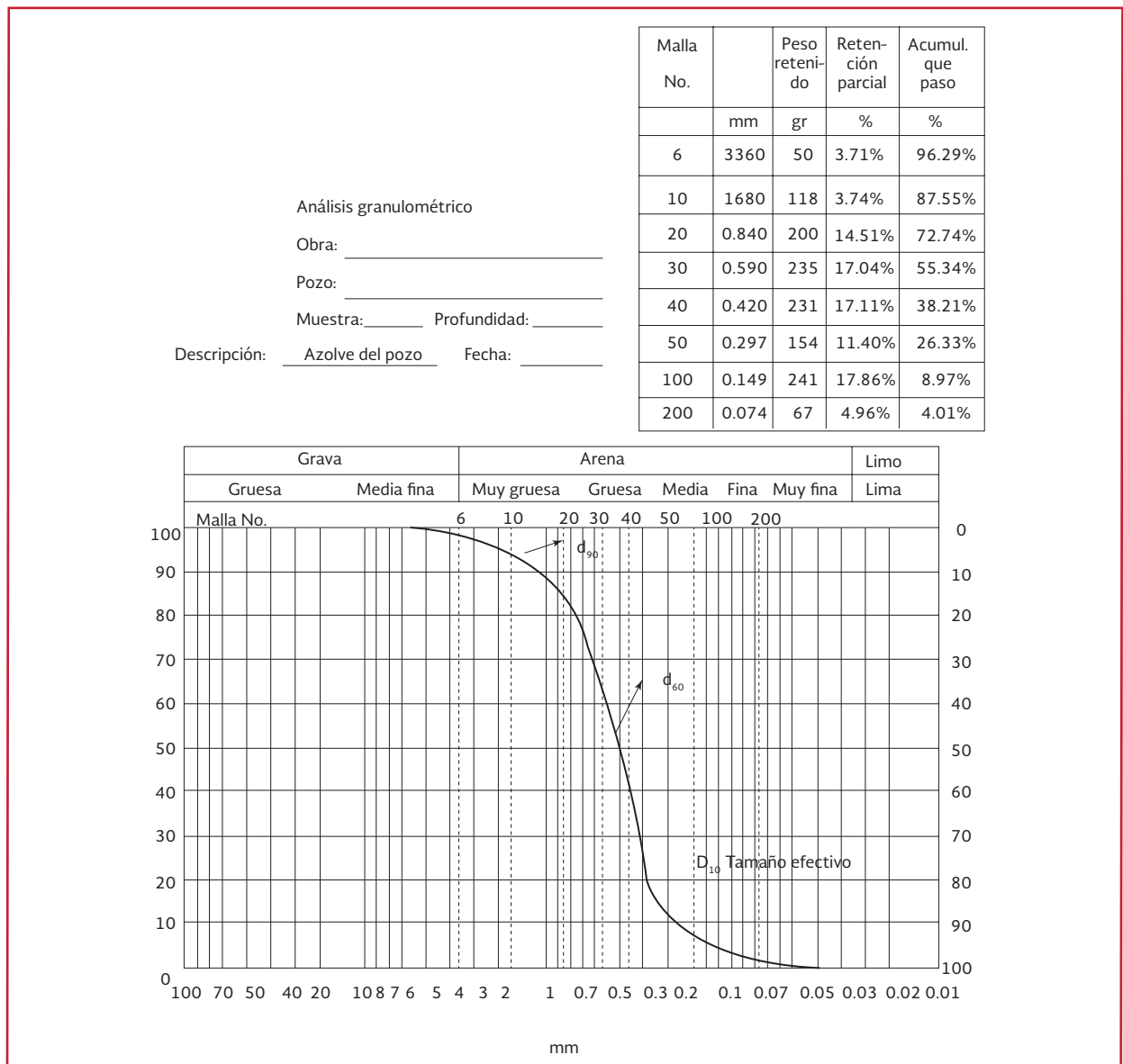
En la Ilustración 8.3 se presenta una curva granulométrica obtenida a partir de una muestra heterogénea extraída del azolve de un pozo en rehabilitación, que tiene un peso de 1 350 gr. En la tabla de la parte superior aparecen los pesos retenidos por cada malla y a partir de ellos se calculan los porcentajes de retención parcial y el porcentaje acumulado que pasa.

En la parte central de la figura aparecen: la clasificación de materiales granulares de la División de Aguas Subterránea del Servicio Geológico de los Estados Unidos, la representación del tamaño de las mallas utilizadas en la prueba y la curva granulométrica obtenida de la muestra del ejemplo.

lógico de los Estados Unidos, la representación del tamaño de las mallas utilizadas en la prueba y la curva granulométrica obtenida de la muestra del ejemplo.

### 8.1.2. MÉTODOS DE DISEÑO DEL FILTRO GRANULAR

Existen varios métodos para diseñar un filtro granular, sean de tamaños uniforme o graduados. Los más usuales se presentan en el Apéndice, ilustrados cada uno con ejemplos.



### 8.1.3. ESPESOR DEL FILTRO GRANULAR

Teóricamente, un filtro granular funciona eficientemente con un espesor igual a la suma de 4 diámetros de sus gránulos. En la práctica resulta imposible la colocación de filtros de tan escaso espesor, por lo que se acostumbra colocarlos de espesores entre 6 y 10 cm. Para garantizar que el filtro envuelva perimetralmente a todo el cedazo, éste debe estar provisto de centradores.

### 8.1.4. ORIGEN DEL FILTRO GRANULAR

El filtro granular es siempre de origen natural y sus gránulos deben ser lo más redondeado que sea posible, característica que se obtiene en los sedimentos clásticos. En los materiales piroclásticos, los gránulos son de formas angulosas, que resultan más propensos al empacamiento, y la

correspondiente disminución de la porosidad. Esta condición desfavorable es extensiva al material triturado, por lo que nunca se deben utilizar como filtro granular en un pozo.

### 8.1.5. SELECCIÓN DEL TAMAÑO DE LA ABERTURA DEL CEDAZO

La selección del tamaño de la abertura del cedazo depende de la curva del filtro granular, correspondiendo a aquel que retenga el 90 por ciento del material del filtro granular, ver Tabla 8.1.

## 8.2. ADEMES DE POZOS

El ademe de un pozo se puede dividir en dos porciones principales: la de ademe ciego o liso, que integra la cámara de bombeo y los tramos intermedios entre acuíferos y la de rejilla o cedazo,

Tabla 8.1 Clasificación de los suelos usada en diferentes países

Dimensión de la partícula elemental (mm)	Sistema Internacional	Departamento de agricultura (U.S)
< 0.001	Arcilla	Arcilla
< 0.002		
0.005	Limo	
0.01		
0.02		Limo
0.05	Arena fina	
0.1		Arena muy fina
0.25		Arena fina
0.2		Arena media
0.5	Arena gruesa	
1		Arena gruesa
2		Arena muy gruesa
3	Grava	
5		Grava fina
10		Grava media
20		
> 20	Grava gruesa y piedras	Grava gruesa

Referencia del Soil Survey Manual (Soil Survey Division Staff)

Ilustración 8.4 Ademe con abertura sobresaliente

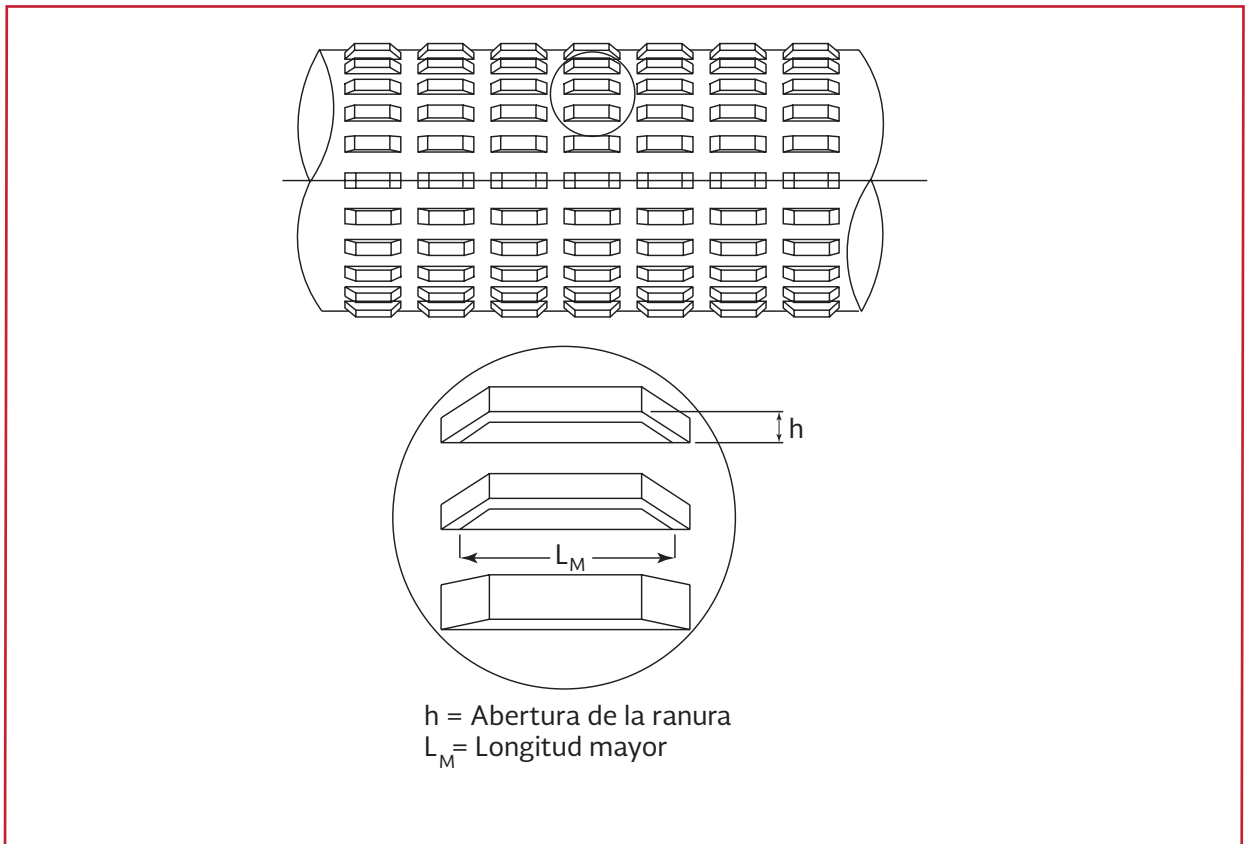
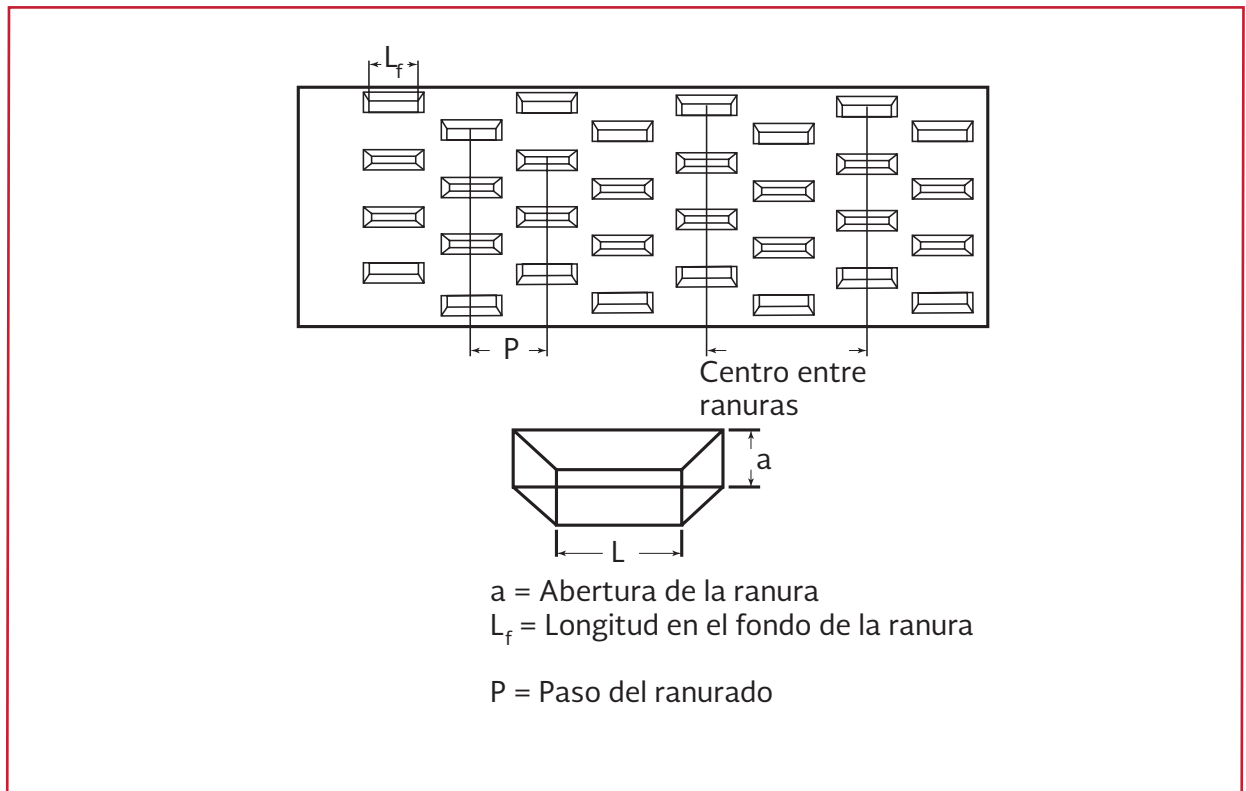


Ilustración 8.5 Ademe con ranuras longitudinales rectas



por donde el agua penetra al pozo. En la rehabilitación de pozos se utilizan preferentemente tramos de cedazo en encamisados interiores.

### 8.2.1. MATERIALES CONSTRUCTIVOS

El tubo que va a ser sometido al proceso de ranuración debe tener las siguientes características (NMX-B-177):

- Fabricado en acero al carbono grado B, soldado con costura longitudinal por resistencia eléctrica de alta frecuencia (proceso ERW)
- El tubo debe ranurarse mediante un proceso de maquinado o troquelado que genere las ranuras en el tubo, con o sin arranque de material, dependiendo del tipo de ranura para dar el área de infiltración requerida. La ranura longitudinal recta debe hacerse únicamente por medio de una máquina especial de ranurado, empleando cortadores circulares para obtener: ranuras maquinadas con alta precisión dimensional, abertu-

ras uniformes que no dañen la estructura molecular del acero, buena apariencia y acabado. Pueden fabricarse en diferentes anchos de ranura y diferentes patrones de ranurado (alternadas, alineadas, agrupadas, etcétera)

#### 8.2.1.1 Tipos de ranuras

La ranura del tubo puede ser sobresaliente o longitudinal recta, con puertos de entrada verticales (paralelos al eje longitudinal del tubo) a ambos lados, y el paso o distancia entre cada ranura y abertura depende del diseño del fabricante para cumplir con el área de infiltración (ver Ilustración 8.6 e Ilustración 8.7).

#### 8.2.1.2 Resistencia al colapso del tubo liso

La resistencia al colapso del tubo de acero al carbono grado B, antes del ranurado, con un límite elástico mínimo de 242 MPa (25 Kgf/mm<sup>2</sup>) y una resistencia última a la tensión mínima de 414 MPa (42 Kgf/mm<sup>2</sup>), considerando un ovalamiento máximo del 1 por ciento (NMX-B-050-SCFI).

Ilustración 8.6 Ranurado sobresaliente

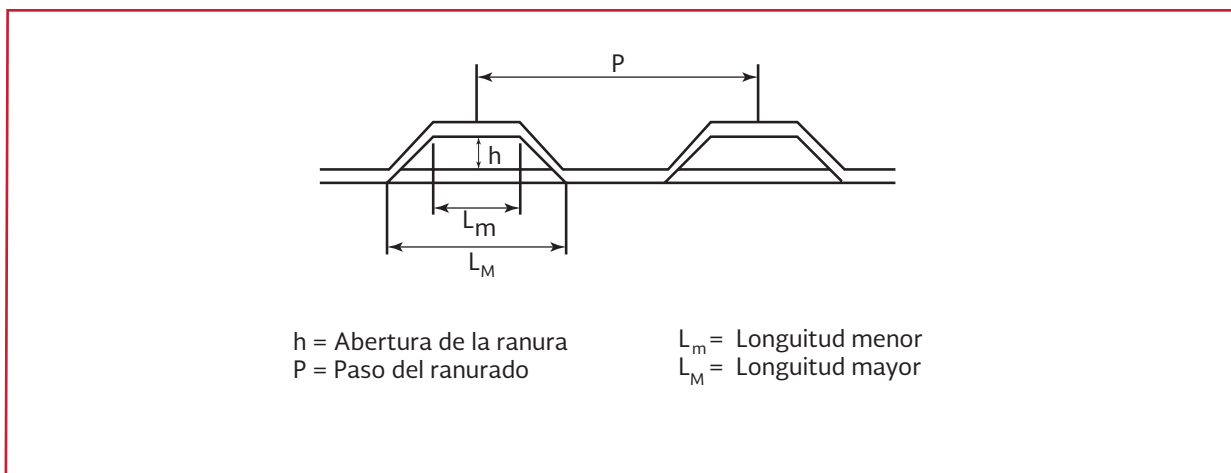
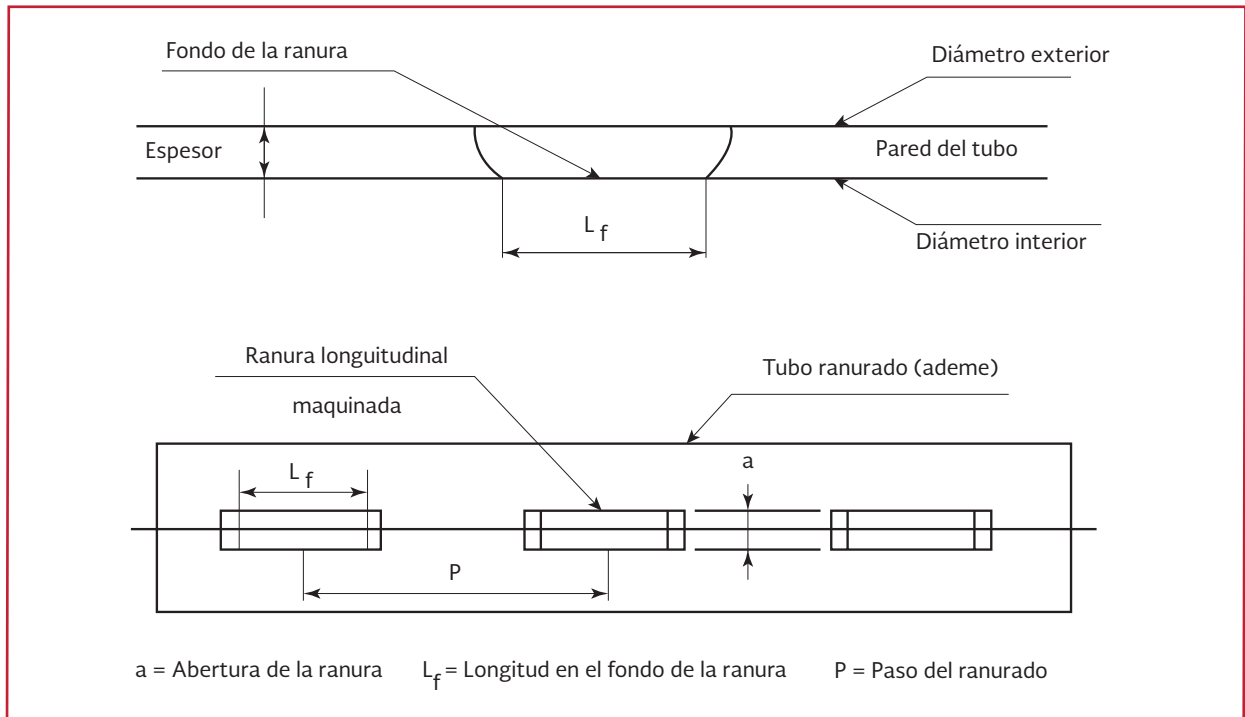


Ilustración 8.7 Ranurado longitudinal



### 8.2.2. UNIÓN DE TUBOS DEL ADEME

La forma de unión de los tubos del ademe durante la construcción del pozo es un tema al que se le ha dado poca importancia dentro de las fases constructivas y sin embargo, es una de las causas más frecuentes de la falla de tuberías de ademe.

### 8.2.3. ADEMES METÁLICOS

Los ademes metálicos pueden ser unidos mediante rosca y cople, cople soldado o por medio de soldadura eléctrica a tope con doble cordón. El orden en que se han citado los métodos corresponde a la calidad técnica de los mismos y por desgracia también a su costo. La soldadura eléctrica a tope, con doble cordón, es el sistema más utilizado, a pesar del gran número de problemas que se pueden presentar por su uso. El problema más frecuente se deriva de la necesidad de suspender la tubería, durante la opera-

ción de ademado, de una flecha que atraviesa el ademe a través de unas perforaciones practicadas transversalmente al tubo (Ilustración 8.8). Una vez soldados dos tubos consecutivos y por tanto ya unidos, se retira la flecha del inferior y se cierran las perforaciones con el mismo trozo de tubería que previamente se había cortado, posteriormente se baja este tramo de tubería al interior del pozo. Es común la falta de atención en la soldadura con que se cierran estas tapas, que se abren con facilidad al poco tiempo de instaladas, dejando abierto un orificio de tamaño suficiente como para que penetre el material del filtro, o el terreno, al interior del pozo, lo que puede significar la ruina de la obra a no ser que se proceda a su encamisado, con un costo que casi siempre sobrepasa la diferencia en precio con el ademe con cople. Otro problema frecuente en este tipo de uniones de ademe, estriba en tubos con la boca deformada por golpes o rolado defectuoso, otros sin biselar o tubos previamente cortados con soplete, de bordes irregulares.

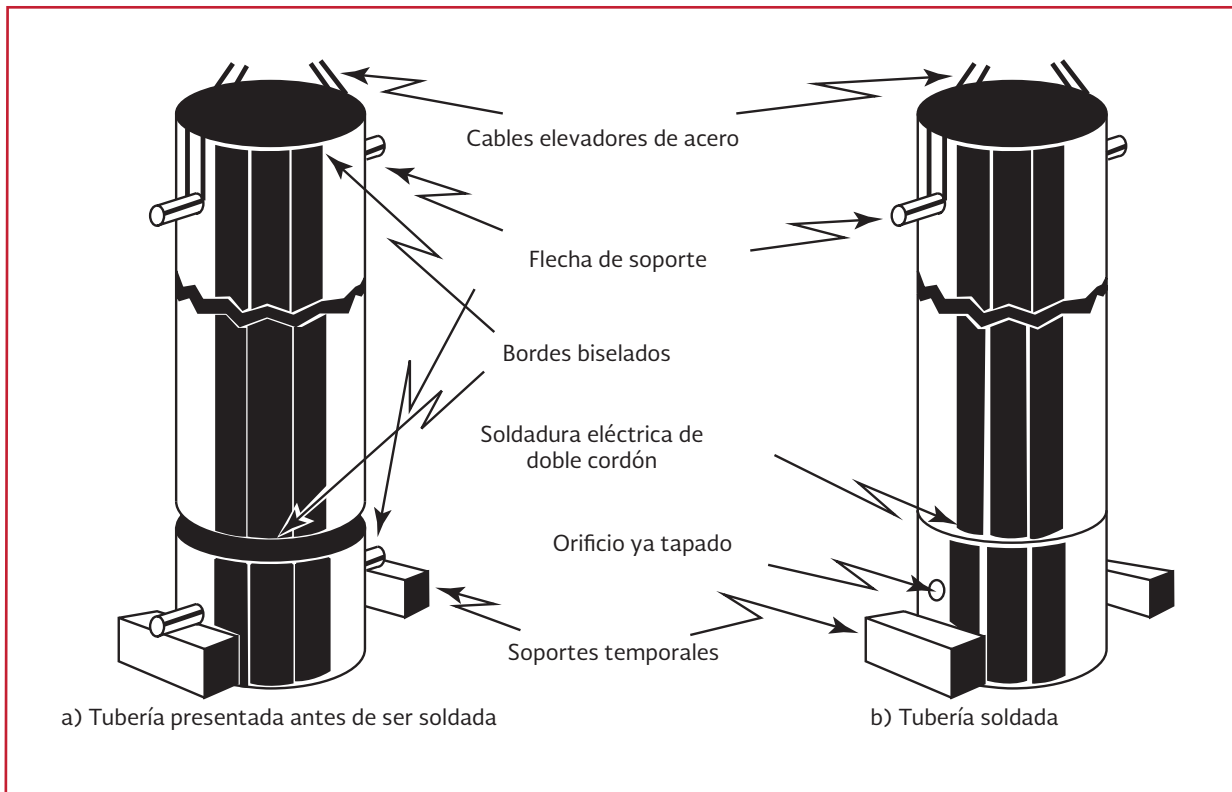


Tabla 8.2 Metales de rejillas y sus aplicaciones

Metal o aleación	Composición nominal	Costo relativo	Aplicaciones
Monel	70 % níquel 30 % cobre	1.5	Altos contenidos de cloruro de sodio combinado con oxígeno disuelto. No se utiliza generalmente en agua subterránea potable.
Acero Inoxidable	74 % acero 18 % cromo 8 % níquel	1.0	Presencia de Sulfuro de Hidrógeno, Oxígeno disuelto, Bióxido de carbono. Bacterias ferruginosas. Alta resistencia mecánica.
Everdur	96 % cobre 3 % sílice 1 % manganeso	1.0	Aguas de alta dureza total, alto cloruro de sodio, sin oxígeno disuelto, alto contenido de hierro. Muy resistente a los tratamientos con ácido.
Bronce Rojo al Silicio	83 % cobre 16 % zinc 1 por ciento sílice	0.9	Condiciones similares a las del EVERDUR, pero inferior en calidad y resistencia.
Hierro Armco	99.84 % hierro puro con doble galvanizado	0.6	No es resistente a una corrosión intensa. Se utiliza para pozos agrícolas en zonas de aguas relativamente neutras.
Acero	99.35-99.72 % hierro 0.09-0.15 % carbono 0.2-0.5 % manganeso (doble galvanizado)	0.5	No es resistente a la corrosión, por lo que en países desarrollados se emplea básicamente en pozos de prueba o de drenaje. No obstante puede alcanzar una larga vida útil si las aguas no son corrosivas ni incrustantes.

Referencia de fabricantes

Ilustración 8.8 Colocación de ademe metálico soldado o tope



Cualquiera de estas circunstancias impiden una correcta soldadura de dos tubos y a veces la necesidad de rellenar pequeños huecos en la unión con varillas de soldadura o pequeñas piezas de acero. Evidentemente esta condición implica una unión defectuosa, que puede provocar serios problemas durante el funcionamiento del pozo.

#### 8.2.4. ADEMES DE PVC

Los ademes de P.V.C. se ensamblan generalmente mediante uniones de campana y espiga y por medio de limpiador y pegamento o con co-

ple unido también con limpiador y pegamento. En los dos casos se obtiene una unión adecuada, tan resistente o más que el propio tubo.

#### 8.2.5. ABERTURAS DE LAS RANURAS DEL TUBO

El tamaño de abertura de las ranuras del tubo debe ser el indicado en la Tabla 8.3. Las tolerancias para todos los tamaños de ranura son de  $\pm 0.5$  mm.

***La normatividad mencionada en este capítulo está referida para el año 2014.***

Tabla 8.3 Tamaño de la abertura de la ranura

Ranura sobresaliente		Ranura longitudinal recta
Abertura	Tamaño en, mm	Tamaño en, mm
I	de 1.0 y 1.5	3.2; 4.0; 4.8 y 6.04
II	de 2.0 y 2.5	
III	de 3.0 y 3.2	

Referencia de la NMX-B-050-SCFI



# 9

## LA SUPERVISIÓN EN LA REHABILITACIÓN DE POZOS

### 9.1. RECOPIACIÓN PRELIMINAR DE INFORMACIÓN

La supervisión de rehabilitación de pozos es una actividad cuyo desempeño resulta muy particular, pues rara vez es posible conocer de antemano el alcance que se tendrá en el trabajo, generalmente, durante la realización del trabajo, el problema se va develando y se requiere que el supervisor tenga capacidad técnica para tomar sobre la marcha las decisiones que se requieran.

Las consecuencias de esta relativa improvisación, es que los resultados de la rehabilitación dependan en gran medida de la calidad de la supervisión, complementada, desde luego, por la de el ejecutor de los trabajos. El conocer sólo en forma aproximada los trabajos de rehabilitación, hace difícil establecer el presupuesto de obra.

Los imprevistos de todo tipo se atenúan en razón directa a la información de que se disponga, referente a las características constructivas, geohidrológicas, etc. del pozo, por lo que antes de iniciar cualquier programa de rehabilitación es conveniente recabar el máximo de información sobre los pozos que se pretenden reparar, con la finalidad de hacer fácil, rápida y acertada la toma de decisiones, se elegirán, las acciones a

llevar a cabo en la rehabilitación siendo en forma general las principales como:

- a) Desinstalación de equipo de bombeo existente y sus accesorios
- b) Corrida con cámara de video en el pozo
- c) Desasolve inicial del pozo
- d) Pistoneo, sifoneo y desasolve final
- e) Detección de ademes deformados o colapsados, etcétera
- f) Corrección de ademes en mal estado, pudiendo estar rotos, perforados o mal soldados, por medio de una cementación, instalación de falso ademe e instalación de camisas
- g) Pescas (extracción de objetos caídos, como pueden ser cables, bombas, herramientas, tuberías, etcétera)
- h) Cepillado de tubería lisa o ranurada, sonar jet, etcétera
- i) Reposición del filtro de grava
- j) Desarrollo y aforo de pozo
- k) Toma de video final
- l) Aplicación de sustancias químicas para evitar bacterias y dispersión de arcillas
- m) Registro de veticalidad
- n) Suministro e instalación de bomba vertical tipo turbina o sumergible, tuberías, cable, sondas y demás accesorios entre otros, etcétera

Por lo anterior se hará una descripción de las razones que motivan la rehabilitación, recopilando la siguiente información a más detalle:

- Croquis de localización del pozo
- Estratigrafía
- Diseño del pozo
- Modificaciones posteriores al diseño original
- Información de los pozos vecinos
- Datos del aforo original y subsecuentes
- Registros de verticalidad
- Registros eléctricos
- Características del equipo electromecánico
- Calidad del agua

Estos datos deben manejarse en tablas o croquis (por pozo) , con el fin de que puedan utilizarse fácilmente. Para seleccionar el método y equipo de rehabilitación deben tomarse en cuenta las siguientes características de la obra de captación:

- Geometría del pozo como: diámetro o diámetros del ademe y localización de los cambios cuando los hubiera, situación de los tramos ciegos y de cedazo y profundidad total del pozo.
- Datos hidráulicos como: nivel estático, dinámico, caudal de explotación y, si existieran, reportes de aforos previos.
- Características del área de trabajo como: acceso al pozo, dimensiones del área de trabajo, dirección en que se desplazará el agua que se extraiga del pozo o los productos químicos que se requieran para la rehabilitación, cercanía a zonas habita-

cionales cuyos moradores pudieran ser incomodados por los trabajos, etcétera.

Con la información antes enunciada, puede elegirse el sistema y equipo más adecuado para realizar la rehabilitación del pozo, el cual se tratará que tenga capacidad sobrada, con el fin de poder realizar maniobras imprevistas que rebasen las expectativas preliminares.

Cuando la bomba del pozo se encuentra en condiciones de operar, puede utilizarse para efectuar una serie de mediciones que pueden resultar muy significativas acerca del funcionamiento del sistema pozo bomba. Este tema se trató con más amplitud en el Capítulo 1.

## 9.2. DESINSTALACIÓN DEL EQUIPO DE BOMBEO

Es recomendable que cuando se desinstala un equipo de bombeo que por mucho tiempo ha estado trabajando en un pozo, se relacionen los acontecimientos anómalos que ocurran en la maniobra, pues si durante la misma se presentaran atorones o fricción de la bomba con el ademe se establecería la profundidad y magnitud del problema.

Una vez desinstalado el equipo de bombeo, se levanta un inventario del mismo. Además, es recomendable que la cuadrilla que realizó el trabajo haga comentarios sobre los problemas detectados durante la maniobra, así como el estado de las cuerdas, chumaceras, porta chumaceras, flechas, partes de fricción, etc. Es conveniente aprovechar el tiempo que se emplea en la reha-

bilitación del pozo para darle mantenimiento al equipo electromecánico.

### 9.3. TRABAJOS DE REHABILITACIÓN

#### 9.3.1. LA SUPERVISIÓN DE CAMPO

La mayor parte de las operaciones de rehabilitación se cotizan en horas máquina trabajando, por lo que la supervisión de campo debe ser muy frecuente o, si es posible, continua, de modo que se estimen solo los tiempos que realmente se emplearon en cada operación.

Por otra parte, sobre todo en las labores de pesca, se pueden requerir de pescantes fabricados en campo, sea por que la pesca lo requiere o por que no se cuenta en el sitio con un pescante de fábrica apropiado. La fabricación o modificación de pescantes puede consumir tiempos.

#### 9.3.2. EL REPORTE DE TRABAJO

Los trabajos de rehabilitación deben quedar registrados en formas especiales que llamaremos "reportes de trabajo", y deberán contener las actividades realizadas en cada turno de trabajo y en los que se deberán registrar los siguientes datos:

- Fecha y turno de trabajo
- Empresa que realiza la rehabilitación
- Tipo de maquinaria empleada
- Persona responsable del trabajo de campo
- Tipo de herramienta con que se trabaja, sus dimensiones, peso y cualquier otra característica que pudiera ser de utilidad,

sobre todo en el caso de una posible pesca. Estas características se pueden señalar en el anverso de la hoja del reporte y para no repetir las en cada turno, nombrarse o numerarse cada herramienta de modo que en lo sucesivo se mencione en forma simplificada; por ejemplo como Barretón No. 1

- Una descripción detallada de las principales maniobras realizadas durante el turno, así como el tiempo empleado en cada una
- Una columna de observaciones donde el operador debe hacer los comentarios que considere pertinentes sobre el trabajo
- Tramo del pozo en que se realiza cada actividad
- Profundidad del nivel estático al principio y final de cada turno

Es recomendable utilizar formatos impresos especiales para hacer el reporte diario de trabajo, ya que con esto se evita la pérdida de información y se facilita su análisis. Los reportes deben recogerse diariamente y después de revisar la información se puede definir la siguiente maniobra en la rehabilitación del pozo.

#### 9.3.3. INFORME FINAL DE LOS TRABAJOS

La rehabilitación de un pozo proporciona una gama de datos de gran importancia, que posteriormente pueden ser empleados para la correcta operación del mismo, para darle un mantenimiento adecuado y para futuras rehabilitaciones.

Se recomienda formar un expediente con los siguientes documentos:

- Croquis del pozo antes de ser rehabilitado y después, si se efectuaron modificaciones en su geometría
- Mediciones de nivel estático, caudal y nivel dinámico antes de rehabilitar el pozo y después, si se volvió a aforar
- Informe del equipo de bombeo desinstalado y del instalado, sea el mismo reparado u otro diferente
- Informe del registro de televisión, y del registro de verticalidad o calibración realizada en el pozo
- Reportes diarios de trabajo
- Registro de las lecturas, curvas de aforo y cálculo del caudal óptimo de explotación
- Materiales usados para la rehabilitación

Además de este expediente, es conveniente elaborar un reporte final en el cual se presente un extracto de las partes más significativas de las operaciones realizadas, con objeto de facilitar la comprensión de un futuro lector que puede no estar familiarizado con este tipo de actividades.

## CONCLUSIONES DEL LIBRO

Con el presente documento se dan a los Organismos Operadores las recomendaciones para la rehabilitación de pozos, teniendo como objetivo aumentar la efectividad para captar agua del acuífero, con la cual se obtiene una mejor eficiencia que sirve como un valor indicativo de cómo está construido el pozo y permite comparar pozos en la misma formación, si se toman iguales tiempos e iguales caudales. Así mismo la rehabilitación de pozos, puede ser muy variada y se centra principalmente en las condiciones geohidrológicas, de proyecto, constructivas y de operación de la obra. Pretender establecer especificaciones precisas de las actividades de rehabilitación resulta prácticamente imposible, por lo que en este libro se les hace referencia de forma enunciativa y nunca limitativa.

Un aspecto importante en la rehabilitación de pozos consiste en su respectiva supervisión ya que se requiere que el supervisor tenga capacidad técnica para tomar sobre la marcha las decisiones que se requieran, esto se debe a que se sólo se conocen en forma aproximada los trabajos necesarios para la rehabilitación, y esto hace difícil establecer el presupuesto de obra. Las consecuencias de esta relativa improvisación, es que los resultados de la rehabilitación dependen en gran medida de la calidad de la supervisión, complementada, desde luego, por la del ejecutor de los trabajos.

Es de gran importancia que se disponga del máximo de información, referente a las características constructivas, geohidrológicas, etc. de los pozos que se pretende reparar, con la finalidad de hacer fácil, rápida y acertada la toma de decisiones.

Acuífero confinado, artesiano o cautivo. Acuífero limitado en sentido vertical por rocas impermeables y sometido a una presión hidrostática superior a la atmosférica.





## GLOSARIO

**Acuífero.** Unidad geológica capaz de almacenar y transmitir agua susceptible de ser explotada en cantidades económicamente apreciables,

**Acuífero libre o freático.** Acuífero que tiene su límite superior definido por el nivel freático sometido a la presión atmosférica.

**Ademe.** Tubo generalmente de acero, acero-cobre, acero inoxidable o policloruro de vinilo (PVC), con diámetro y espesor definidos, liso o ranurados, cuya función es evitar el derrumbe o el colapso de las paredes del pozo que afecten la estructura integral del mismo; en su porción ranurada permite el flujo del agua, hacia los elementos mecánicos de impulsión de la bomba.

**Aforo.** Prueba de bombeo a caudal variable para establecer el caudal óptimo de explotación de un pozo.

**Anión.** Ion con carga eléctrica negativa.

**Anillo de acoplamiento.** Conector de tubos, que puede ser soldado o roscado y sirve como elemento de alineación de los tubos para pozos de agua.

**Ánodo.** Electrodo cargado positivamente.

**Arcilla.** Material clástico en que predominan los tamaños menores a 1/256 de mm.

**Arreglo granulométrico.** Distribución en por ciento y por tamaño de los gránulos que integran una muestra.

**Área de infiltración (AIS, AIL).** Área libre o abierta que tiene el tubo de ademe debido a las aberturas de sus ranuras y área teórica de infiltración para captar agua, generalmente se designa en  $\text{cm}^2/\text{m}$ .

**Azolve.** Material sólido en suspensión proveniente del acuífero que se va introduciendo en el interior del pozo y se deposita en el fondo del mismo.

**Bentonita.** Arcilla plástica altamente coloidal, del grupo de las montmorilonitas, caracterizada por la propiedad de aumentar varias veces su volumen al ponerse en contacto con el agua.

**Caliza.** Roca sedimentaria 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. Generalmente se expresa en  $1/\text{s}/\text{m}$ .

**Carbonato.** Mineral formado por la precipitación orgánica o inorgánica, en una solución acuosa de calcio, magnesio o hierro ( $\text{CO}_3$ ).

**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.

**Cedazo.** Ademe con aberturas de forma, tamaño y espaciamiento 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 o piezométrico, con 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.

**Desarrollo del pozo.** Conjunto de actividades físicas o químicas tendientes a mejorar las condiciones hidráulicas de un pozo.

**Descenso real del pozo o abatimiento 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.

**Espacio anular.** Espacio comprendido entre la pared de la perforación y el ademe del pozo. Frecuentemente aloja al filtro granular.

**Estratigrafía.** Parte de la Geología que trata del estudio de las unidades o formaciones geológi-

cas; su origen, distribución espacial, forma de depósito y edad.

**Filtro granular.** Material granular redondeado, natural, de tamaños seleccionados especialmente para retener la entrada de material fino al interior del pozo.

**Fluidos de perforación.** Agua con bentonita aire con espumante y agua o lodos orgánicos (polímeros), 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 que 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.

**Limo.** Material clástico en el que predominan los tamaños que varían entre 1/16 y 1/256 mm.

**Nivel dinámico.** Es el nivel del agua dentro del pozo cuando el equipo de bombeo está en operación.

**Nivel estático o Espejo de agua.** Es la distancia comprendida desde la superficie del terreno hasta la zona de saturación.

**Nivel freático.** Nivel superior de la zona saturada, en el cual el agua contenida en los poros se encuentra sometida a la presión atmosférica.

**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.

**Perforación a percusión.** Sistema de perforación en el cual se fragmenta la roca por medio del golpeo de una herramienta pesada, extrayéndose los detritus con una cuchara.

**Perforación rotaria con circulación directa.** Sistema de perforación en el cual el fluido es bombeado al pozo a través de la tubería de perforación y asciende por el espacio anular entre la tubería de perforación y el agujero.

**Perforación rotaria con circulación inversa.** Sistema de perforación en el cual el fluido es bombeado al pozo por el espacio anular entre tubería de perforación y agujero y asciende por el interior de la tubería de perforación.

**Permeabilidad.** Capacidad de un material para transmitir un fluido.

**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 (Potencial hidrógeno).** Medida de la acidez o alcalinidad de una solución. Un pH de 7 indica

una solución neutra; bajo el siete la solución es ácida y sobre el es alcalina o básica.

**Polución.** Niveles de concentraciones contaminantes tales que limitan el uso potencial del agua.

**Porosidad.** Es el volumen de poros entre el volumen total de roca, es decir, la cantidad de huecos que son capaces de almacenar fluidos, ya sea que estén o no interconectados.

**Porosidad efectiva.** Es la relación del volumen total de poros comunicados entre el volumen total de roca.

**Porosidad absoluta.** Es la relación del volumen total de poros (comunicados y no comunicados) entre el volumen total de roca.

**Pozo artesiano.** El que explota agua proveniente de un acuífero confinado.

**Pozo de observación.** Pozo que se utiliza para medir periódicamente la frecuencia y magnitud de los niveles estáticos y dinámicos por efectos del bombeo, provocados por pozos de producción contiguos y sirven además para la toma de muestras del agua subterránea para analizar su calidad.

**Quelante.** Compuesto que retrasa por un determinado tiempo la precipitación del material disuelto en una reacción química.

**Ranura longitudinal recta.** Abertura maquinada con cortador orientado axialmente (Ilustración 8.5).

**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.

**Rocas carbonatadas.** Rocas sedimentarias formadas por la precipitación y acumulación de carbonatos. Las más abundantes son la caliza y la dolomía.

**Rocas clásticas.** Rocas sedimentarias compuestas principalmente por fragmentos de rocas de

diferentes tamaños, erosionados y depositados a cierta distancia de la roca madre.

**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.

## BIBLIOGRAFÍA

- Asdrúbal, V. (2002). Comparación de tres métodos de cálculo de eficiencia de pozos
- Agustín, B (2006). Principios y fundamentos de la hidrología superficial.
- Bourdet, D. A. (1980). Determination of fissure volume and block size in fractured reservoirs by type curve analysis. Dallas. U.S.A: Paper SPE 9293 presented at the 1980 SPE Annual Fall Techn.Conf and Exhib.
- Campos-Aranda, F. (2010). Introducción a la Hidrología Urbana. Editorial Printengo, San Luis Potosí.
- Castany, G. (1973). Tratado práctico de las aguas subterráneas. Barcelona, España: Ediciones Omega.
- Chapingo, U. A. (1987). Geohidrología. Chapingo, México: Universidad Autónoma de Chapingo, Depto. de Irrigación.
- Custodio, E. Y. (1983). Hidrología subterránea. Barcelona, España: Ediciones Omega, S.A.
- David, H. Manual de prácticas. Hidrología subterránea.
- Dawson, K. A. (1991). Aquifer testing design and analysis of pumping and slug test. Michigan, U.S.A.: Lewis Publishers.
- Driscoll, F. (1989). Groundwater and wells. Johnson Division, St. Paul, Minnesota, U.S.A.
- E., V. S. (1995). Modelo conceptual hidrogeológico y características hidráulicas del acuífero en explotación en la parte meridional de la cuenca de México. Tesis de Maestría en Aguas Subterráneas, Posgrado en Geofísica, UACPyP del CCH.
- Eskenazi, E. (1989). ELÉMENTS D'HYDROLOGIE. Liege, Bélgica: Université de Liege, Faculté des Sciences Appliquées e Institut du Génie Civil.
- INEGI. (2013). Catastro. Recuperado el 28 de Agosto de 2013, de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/catastro/>.
- Javier, F. (2012). Hidráulica subterránea: Principios básicos. Salamanca, España: Editorial Ariel.
- J.J., C. R. (1992). The hydrogeology of the San Luis Potosí area, Mexico. Tesis doctoral. Universidad de Londres, Gran Bretaña, 198pp.
- Jones, G. A. (1981). Pumping test analysis In Case Studies in Groundwater Resources Evaluation. Oxford, G.B.: ed. by Lloyd, J.W. Clarendon Press pp. 65-86.
- Kazerni, H. M. (1969). The interpretation of interference test in naturally fractured reservoirs with uniform fracture distribution. Soc. of Petrol. Engrs J., pp. 463-472.
- King, H. W. (1982). Hidráulica. México, D. F.: Editorial Trillas, S.A. de C.V.

- Klimetov, P. Y. (1990). Metodología de las investigaciones hidrogeológicas. Moscú, URSS: Editorial MIR.
- Kruseman, G. A. (1994). Analysis and evaluation of pumping test data. Wageningen, The Netherlands.: Second Edition. International Institute for Land Reclamation and Improvement.
- Lisley, K. Y. (1985). Hidrología para ingenieros: . México, D.F.
- Mavor, M. A. (1979). Transient pressure behavior of naturally fractured reservoirs. California SPE Regional Meeting, Ventura, California: Paper SPE 7977 presented at the 1979 .
- Miliarium Aureum, S.L. (2001-2011).
- Meilhac, A. (1991). Interpretation et discussion des pompages. ILRI París, Francia: D'ESSAI, Bulletin 11F.
- Mijailov, L. (1990). Hidrogeología. Moscú, URSS: Editorial MIR.
- Ochoa A, L., Rangel M, J., Navarro B, S., & Maldonado S, J. (1993). Aportaciones en alcantarillado, Informe final (primera etapa) del proyecto UI-9302. Jiutepec Morelos: IMTA.
- Nanía, L. (2008). Modelos de flujo en calle y criterios de peligro. En Curso de Hidrología urbana. pp. 64-69. FLUMEN, Barcelona.
- NOM-003-CNA. (1996). Requisitos durante a construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos.
- NOM-004-CNA (2004). Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general.
- NOM-006-ENER. (1995). Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación.- límites y método de prueba.
- NOM-010-ENER.(2004) Eficiencia energética del conjunto motor bomba sumergible tipo pozo profundo. Límites y métodos de prueba.
- NOM-011-STPS. (2001). Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se genere ruido.
- NMX-B-177. (1990). Tubos de Acero Con o Sin Costura Negros y Galvanizados.
- NMX-AA-124-SCFI. (2006). Polifosfatos.
- NMX-B-050-SCFI. (2000). Industria siderúrgica - tubos ranurados de acero al carbono para ademe de pozos de agua para extracción y/o infiltración-absorción de agua –especificaciones.
- Rathod, K. A (1984). Numerical method of pumping test analysis using microcomputers. Groundwater Field Reports, Vol. 22, No. 5, pp. 601 608.
- Rushton, K. A. (1979). Seepage and groundwater flow. John Wiley and Sons, Great Britain, 339 p.
- Soto, G., & Guaycochea, D. (2007 2). Fundamentos de Hidráulica. México DF.: División de Ciencias Basicas e Ingeniería, UAM Azc.

Streitsova, T. (1974). Drawdown in compressible unconfined aquifer. J. Hydraul. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engrs., Vol. 100(HY1 1), pp. 1601-1616.

Valencia, M. (2010). Mantenimiento y la rehabilitación de los pozos de agua. Curso de aguas subterráneas. Bogotá, Colombia.

Valencia, C. (2010). Manual de mantenimiento de pozos para aguas subterráneas.

Vargas, V., & Arellano, F. (2002). Comparación de tres métodos para el cálculo de eficiencia de pozos. Revista Geológica de América Central, 97-110.

Villanueva, M., Iglesias A. (1984). Pozos y acuíferos, técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España.

UNNO. (2013). Universidad Nacional del Nordeste, Facultad de Ingeniería. Obtenido de <http://ing.unne.edu.ar/pub/aguasubterranea.pdf>

Witherspoon, P. J. (1967). Interpretation of aquifer gas storage condition from water pumping tests. Amer. Gas. Assoc. New York, 273 pp.





# ANEXOS

## A.1. CEMENTACIONES

Tabla Anexo.1

**Cantidades de materiales necesarios para obtener  
de concreto 1 m<sup>3</sup>**

Proporciones	Cemento en Kg	Arena en m <sup>3</sup>	Grava en m <sup>3</sup>
1:1:0	1,040	0.80	0.00
1:1:1	693	0.53	0.53
1:1:2	520	0.40	0.80
1:2:0	693	1.06	0.00
1:2:1	520	0.80	0.40
1:2:2	416	0.64	0.64
1:2:3	347	0.53	0.80
1:2:4	298	0.46	0.92
1:3:2	347	0.80	0.53
1:3:3	298	0.69	0.69
1:3:4	260	0.60	0.80
1:3:5	231	0.53	0.89

Tabla Anexo.2

Cantidades de Cemento –Arena Grava para obtener una altura de 1 m de mezcla en diferentes diámetros de ademe										
Proporción	Volumen	Diámetro (cm)								
		60.96	50.8	45.72	40.64	35.56	32.39	27.31	21.91	16.83
	m <sup>3</sup>	24"	20"	18"	16"	14	12 3/4"	10 3/4"	8 5/8"	6 5/8"
1:1:0	Cemento	291	200	161	126	96	79	61	39	23
	Arena	0.22	0.15	0.12	0.1	0.07	0.06	0.05	0.03	0.02
	Grava	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:1:1	Cemento	194	133	107	84	64	53	41	26	15
	Arena	0.15	0.1	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01
	Grava	0.15	0.1	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01
1:1:2	Cemento	146	100	81	63	48	40	30	20	12
	Arena	0.11	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01
	Grava	0.22	0.15	0.12	0.1	0.07	0.06	0.04	0.03	0.02
1:2:0	Cemento	194	133	107	84	64	53	41	26	15
	Arena	0.3	0.2	0.16	0.13	0.1	0.08	0.06	0.04	0.02
	Grava	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:2:1	Cemento	146	100	81	63	48	40	30	20	12
	Arena	0.22	0.15	0.12	0.1	0.07	0.06	0.05	0.03	0.02
	Grava	0.11	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01
1:2:2	Cemento	116	80	64	50	38	32	24	16	9
	Arena	0.18	0.12	0.1	0.08	0.06	0.05	0.04	0.02	0.01
	Grava	0.18	0.12	0.1	0.08	0.06	0.05	0.04	0.02	0.01
1:2:3	Cemento	97	67	54	42	32	26	20	13	8
	Arena	0.15	0.1	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01
	Grava	0.22	0.15	0.12	0.1	0.07	0.06	0.05	0.03	0.02
1:2:4	Cemento	83	57	46	36	28	23	17	11	7
	Arena	0.13	0.09	0.07	0.06	0.04	0.03	0.03	0.02	0.01
	Grava	0.26	0.18	0.14	0.11	0.09	0.07	0.05	0.03	0.02
1:3:2	Cemento	97	67	54	42	32	26	20	13	8
	Arena	0.22	0.15	0.12	0.1	0.07	0.06	0.05	0.03	0.02
	Grava	0.15	0.1	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.1

Tabla Anexo.3

Preparación de lechada de inyección agua-cemento: cantidades de agua y lechada preparada para distintas relaciones A/C y no. de sacos																					
No.	Relación 1/1		Relación 2/1		Relación 3/1		Relación 4/1		Relación 5/1		Relación 6/1		Relación 7/1		Relación 8/1		Relación 9/1		Relación 10/1		
	Agua	Lechada	Agua	Lechada	Agua	Lechada	Agua	Lechada	Agua	Lechada	Agua	Lechada	Agua	Lechada	Agua	Lechada	Agua	Lechada	Agua	Lechada	
1	33.0	49.5	66.0	82.5	99.0	115.5	132.0	148.5	165.0	181.5	198.0	214.5	231.0	247.5	264.0	280.5	297.0	313.5	330.0	346.5	
2	66.0	99.0	132.0	165.0	198.0	231.0	264.0	297.0	330.0	363.0	396.0	429.0	462.0	495.0	528.0	561.0	594.0	627.0	660.0	693.0	
3	99.0	148.5	198.0	247.5	297.0	346.5	396.0	445.5	495.0	544.5	594.0	643.5	693.0	742.5	792.0	841.5	891.0	940.5	990.0	1 039.5	
4	132.0	198.0	264.0	330.0	396.0	462.0	528.0	594.0	660.0	726.0	792.0	858.0	924.0	990.0	1 056.0	1 122.0	1 188.0	1 254.0			
5	165.0	247.5	330.0	412.5	495.0	577.5	660.0	742.5	825.0	907.5	990.0	1 072.5	1 155.0	1 237.5							
6	198.0	297.0	396.0	495.0	594.0	693.0	792.0	891.0	990.0	1 089.0											
7	231.0	346.5	462.0	577.5	693.0	808.5	924.0	1 039.5													
8	264.0	396.0	528.0	660.0	792.0	924.0	1 056.0	1 188.0													
9	297.0	445.5	594.0	742.5	891.0	1 039.5															
10	330.0	495.0	660.0	825.0	990.0	1 155.0															
11	363.0	544.5	726.0	907.5																	
12	396.0	594.0	792.0	990.0																	
13	429.0	643.5	858.0	1 072.5																	
14	462.0	693.0	924.0	1 155																	
15	495.0	742.5																			

Tabla Anexo 3 (continuación)

Preparación de lechada de inyección agua-cemento: cantidades de agua y lechada preparada para distintas relaciones A/C y no. de sacos																					
No.	Relación 1/1		Relación 2/1		Relación 3/1		Relación 4/1		Relación 5/1		Relación 6/1		Relación 7/1		Relación 8/1		Relación 9/1		Relación 10/1		
	Agua	Lechada	Agua	Lechada	Agua	Lechada	Agua	Lechada	Agua	Lechada	Agua	Lechada	Agua	Lechada	Agua	Lechada	Agua	Lechada	Agua	Lechada	
16	528.0	792.0																			
17	561.0	841.5																			
18	594.0	891.0																			
19	627.0	940.5																			
20	660.0	990.0																			
21	693.0	1 039.5																			

## A.2. CORROSIÓN E INCRUSTACIÓN

Tabla Anexo.4

Tabla de concentraciones químicas				
Característica	Incrustación		Corrosión	
	Concentración	Efecto	Concentración	Efecto
Dureza Total de Carbonato	>300 p.p.m.	Deposición de Carbonatos de calcio		
Total de Hierro (Fe)	>2 p.p.m.	Precipitación de Hierro		
Total de Manganeseo (Mn)	>1 p.p.m.	Precipitación de manganeseo		
pH	Alto			
Oxígeno	Presencia			
pH	>7.5	Aguas incrustantes	<7	Aguas corrosivas
Ácido sulfhídrico H <sub>2</sub> S			Pueda olerse o sabor a huevo podrido	Corrosión fuerte
Solidos Totales			>1000 p.p.m.	Corrosión electrolítica
Bióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )			>50 p.p.m.	Aguas corrosivas
Cloruros (como Cl)			>500 p.p.m.	Agua corrosivas
Oxígeno disuelto (O <sub>2</sub> )			Presencia	Ayuda a la Corrosión

### A.2.1. ÍNDICE DE RYZNAR

Ha sido propuesto como una medida cuantitativa de la tendencia del agua a ser incrustante o agresiva. Siempre es positivo

$$IR = 2 pHs - pH$$

$$pHs = pCa + palc + C$$

$$pCa = 4.9996 - 0.4333 \ln(D)$$

$$palc = 4.7006 - 0.4345 \ln(A)$$

$$C = 2.4566 - 0.0189 T + 0.0363 \ln(STD)$$

dónde:

$pHs$  = Potencial hidrógeno de saturación

$pH$  = Potencial de hidrógeno

$pCa$  = Potencial de dureza de calcio

$palc$  = Potencial de alcalinidad

$C$  = Potencial de temperatura y sólidos disueltos

$T$  = Temperatura K (°C)

$A$  = Alcalinidad total (mg/L) de  $CaCO_3$

$D$  = Dureza de calcio (mg/L) de  $CaCO_3$

$STD$  = Sólidos disueltos totales (mg/L)

Ver Tabla Anexo.5

Tabla Anexo.5

Tipo de clasificación			
Límites de clases			Carácter del agua
4	≤	$I_R < 5$	Muy incrustante
5	≤	$I_R < 6$	Moderadamente incrustante
6	≤	$I_R < 7$	Poco incrustante o corrosiva
7	≤	$I_R < 7.5$	Corrosiva
7.5	≤	$I_R < 9$	Francamente corrosiva
9	≤	$I_R$	Muy corrosiva

### A.2.2. ÍNDICE DE LANGELIER

Este índice es indicativo del grado de inestabilidad del agua con respecto al depósito o a la solubilidad del carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ).

Si el valor del índice ( $IL$ ) es positivo, existe tendencia a depositar carbonato de calcio (efecto incrustante).

Si el valor del índice ( $IL$ ) es negativo, existe tendencia a disolver carbonato de calcio (efecto corrosivo).

$$IL = pH - pHs$$

dónde:

$pHs$  = potencial de saturación de Langelier.

$pH$  = potencial de hidrógeno

$pHs$  =  $A + B \log(Ca^{2+}) \log(\text{alcalinidad})$

En caso de ser necesario pueden interpolarse valores ver Tabla Anexo.6, Tabla Anexo.7 y Tabla Anexo.8

Tabla Anexo.6

Valores de la constante A, en función de la temperatura del agua	
Temperatura del agua <i>k</i>	A
273 K (0)	2.60
277 K (4)	2.50
281 K (8)	2.40
285 K (12)	2.30
289 K (16)	2.20
293 K (20)	2.10
297 K (24)	2.00
301 K (28)	1.90
305 K (32)	1.80

Tabla Anexo.7

Valores de la constante B, en función del residuo de sólidos totales disueltos	
Residuo de sólidos totales disueltos (mg/l)	B
0	9.70
100	9.77
200	9.83
400	9.86
800	9.89
1 000	9.90

Tabla Anexo.8

Logaritmo de las concentraciones del ion calcio y alcalinidad	
Ca <sub>2+</sub> o alcalinidad (mg/l) como CaCO <sub>3</sub> equivalente log	
10	1.00
20	1.30
30	1.48
40	1.60
50	1.70
60	1.78
70	1.84
80	1.90
100	2.00
200	2.30
300	2.48
400	2.60
500	2.70
600	2.78
700	2.84
800	2.90
900	2.95
1 000	3.00



## A.3. DISEÑO DE FILTRO GRANULAR

### A.3.1. DEFINICIONES

La nomenclatura utilizada en las fórmulas de los métodos de diseño de filtro que se tratan a continuación, corresponde principalmente al tamaño de los granos y el porcentaje del peso de la muestra, tanto del acuífero o material de azolve, como del filtro:

#### A.3.1.1. Tamaño (dX)

Es el tamaño de las partículas (d) tal que el (x) porcentaje en peso es más pequeño. Por tanto (100- x) representa el porcentaje retenido por la malla de abertura (d). Por ejemplo ( $d_{90}$ ) quiere decir que el 90 por ciento del total del material es menor a 2 mm y el 10 por ciento es mayor (punto  $d_{90}$  de la Ilustración Anexo.1).

#### A.3.1.2. Coeficiente de uniformidad

Es la razón del tamaño  $d_{60}$  respecto al tamaño  $d_{10}$  del material ( $d_{60}/d_{10}$ ). Valores del coeficiente que se acerquen a 1, indican una muestra homogénea. El valor 1 no se da en materiales naturales y representa una homogeneidad perfecta. En la Ilustración anexo 1,  $d_{60} = 0.61$  y  $d_{10} = 0.17$ , por tanto el Coeficiente de Uniformidad resulta de 3.59.

#### A.3.1.3. Tamaño Efectivo

Es el tamaño del tamiz que retiene el 90 por ciento de la muestra y que por consecuencia deja pasar el 10 por ciento de esta ( $d_{10}$ ). En la Ilustración Anexo.1) el Tamaño Efectivo es igual a 0.17.

### A.3.2. MÉTODO DE NOLD

El método de Nold, desarrollado en 1962, obtiene dos valores correspondientes a los límites superior a inferior de los tamaños del grano del filtro. Por lo tanto, para obtener este material sólo se tiene que cernir la grava a través de dos cribas de estos tamaños, quedando como filtro el material que se retuvo entre las dos (Ilustración Anexo.2).

Este método se basa en el coeficiente de uniformidad del acuífero; si este valor oscila entre 3 y 5, se trata de un material poco uniforme, el  $d_{95}$  del acuífero se multiplica por 5, obteniéndose así el límite superior del filtro, y el  $d_{90}$  del acuífero, multiplicado por 4, proporciona el límite inferior. Si el coeficiente de uniformidad es menor de 3; el  $d_{85}$  del acuífero multiplicado por 5, proporciona el límite superior del filtro y el  $d_{75}$  multiplicado por 4, señala el límite inferior. En el ejemplo de la Ilustración Anexo.2, ver Tabla Anexo.10 se presentan dos curvas granulométricas, que corresponden a dos acuíferos: uno uniforme y el segundo no uniforme; en el

Tabla Anexo.9

Coeficiente de uniformidad del acuífero d	Límite Superior	Límite Inferior
Entre 3 y 5	$d_{95} \times 5$	$d_{90} \times 5$
Menor a 3	$d_{85} \times 5$	$d_{75} \times 5$

Ilustración Anexo.1 Curva granulométrica acumulativa

Análisis granulométrico

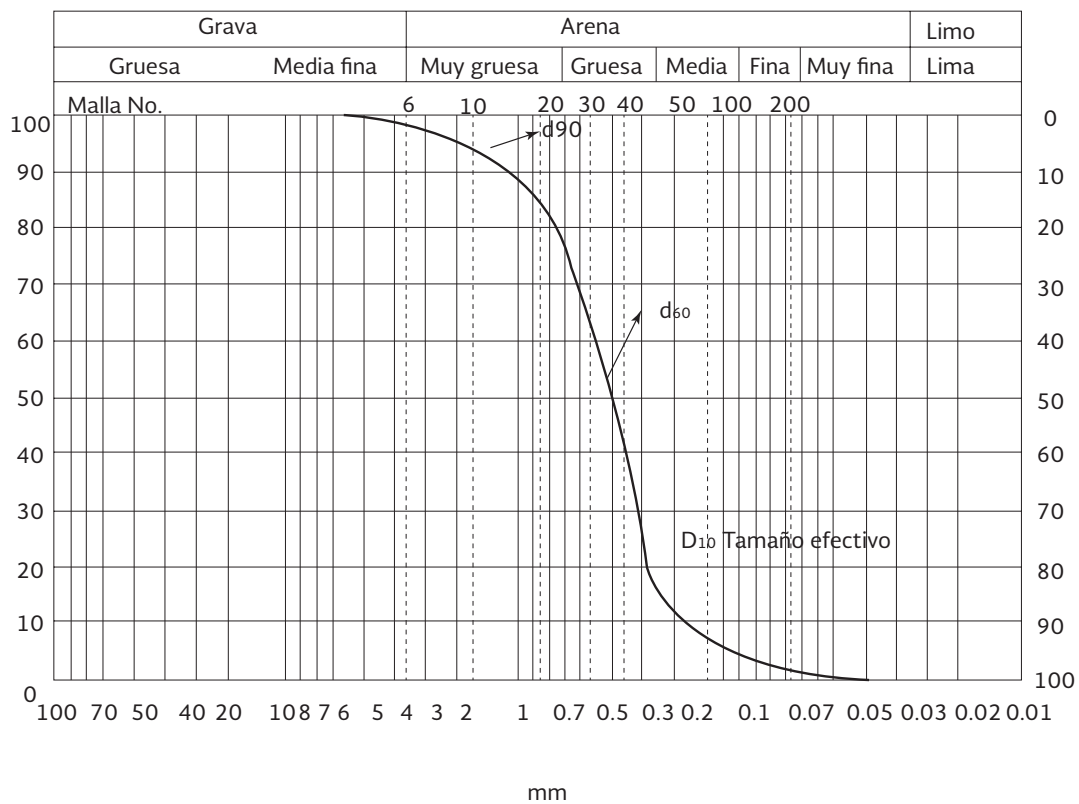
Obra: \_\_\_\_\_

Pozo: \_\_\_\_\_

Muestra: \_\_\_\_\_ Profundidad \_\_\_\_\_

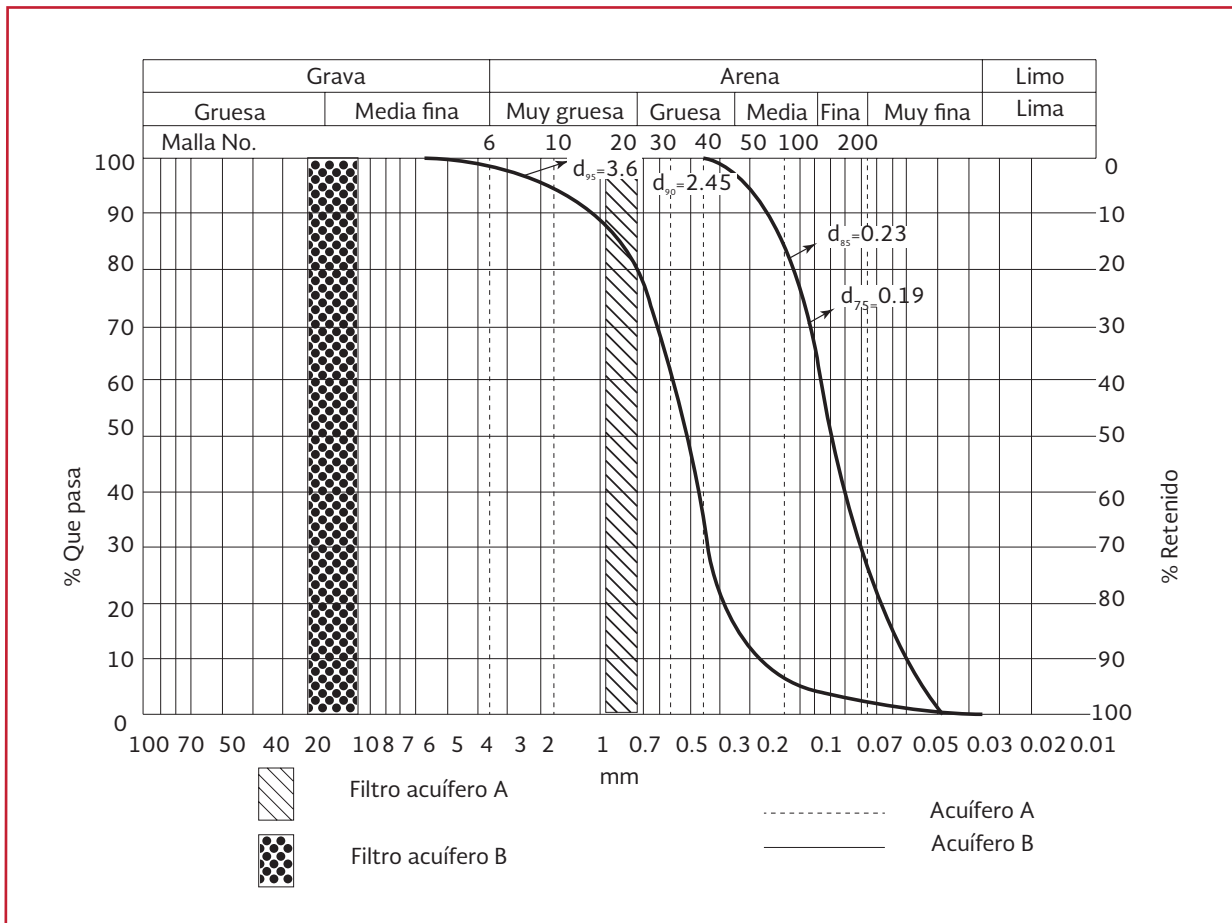
Descripción: Azolve del pozo Fecha: \_\_\_\_\_

Malla No.		Peso retenido	Retención parcial	cumul que paso
	mm	gr	%	%
6	3360	50	3.71%	96.29%
10	1680	118	3.74%	87.55%
20	0.840	200	14.51%	72.74%
30	0.590	235	17.04%	55.34%
40	0.420	231	17.11%	38.21%
50	0.297	154	11.40%	26.33%
100	0.149	241	17.86%	8.97%
200	0.074	67	4.96%	4.01%



primer caso:  $(d_{60}/d_{10}) = 0.15/ 0.054 = 2.78$ ,  
 su límite superior será  $5 d_{85} = 0.23 (5) = 1.15$ .  
 El límite inferior se calcula  $d_{75} = 4 (0.2) = 0.8$ .

En el 2° caso:  $(d_{60}/d_{10}) = 0.78/0.15 = 5.2$  y el límite superior será  $5 d_{95} = 3.6 (5) = 18$ . El límite inferior se calcula como  $d_{90} = 2.45 (4) = 9.8$ .



### A.3.3. MÉTODO DE FUCHS (MODIFICADO)

Este método se desarrolló en 1963, y es aplicable preferentemente a acuíferos heterogéneos, basándose en el coeficiente de uniformidad del acuífero.

Si el coeficiente de uniformidad es menor a 3:

- $d_{95}$  del acuífero por 4 igual a  $d_{50}$  del filtro
- $d_{50}$  del acuífero por 16 igual a  $d_{50}$  del filtro

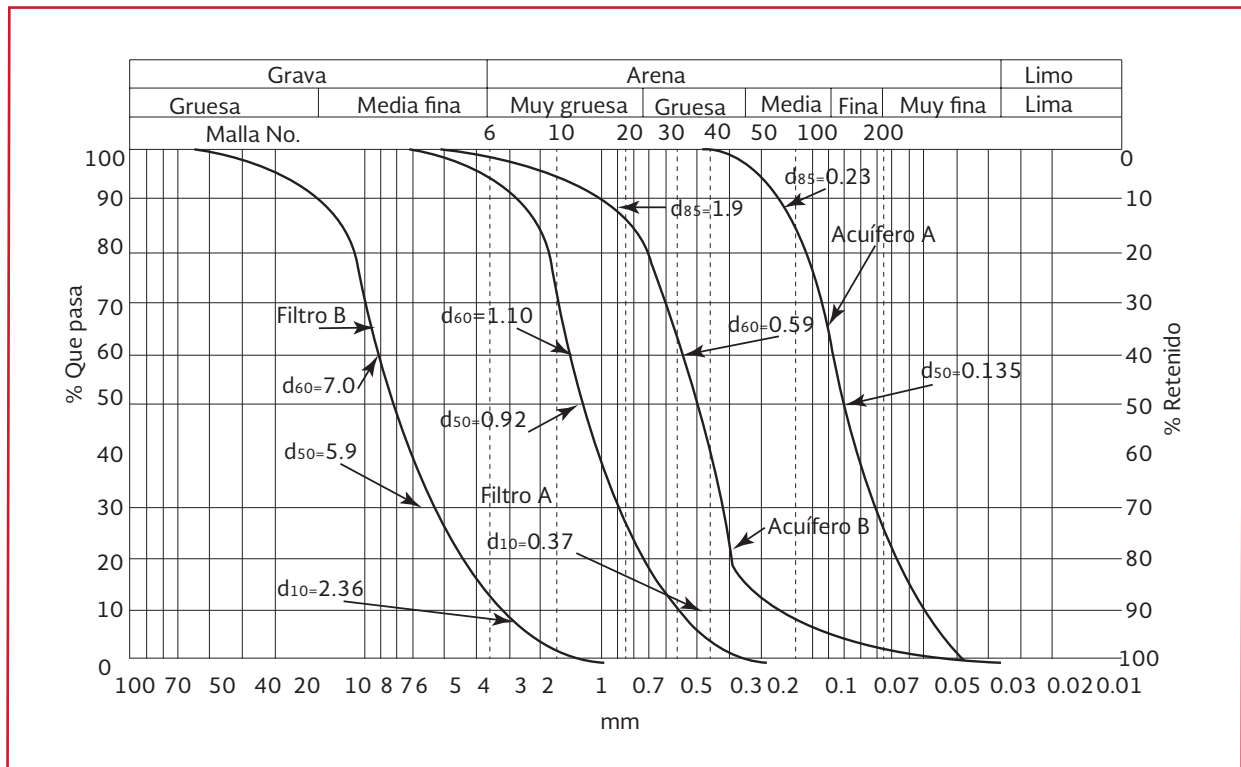
Se toma como tamaño del filtro el menor de los dos  $d_{50}$  obtenidos.

Si el coeficiente de uniformidad varía entre 3 y 5:

- $d_{95}$  del acuífero por 4 igual a  $d_{50}$  del filtro
- $d_{50}$  del acuífero por 10 igual a  $d_{50}$  del filtro

Se toma como tamaño del filtro el menor de los dos  $d_{50}$  obtenidos. Utilizando como pivote el  $d_{50}$  del filtro se admiten filtros cuyo coeficiente de uniformidad no exceda de 3. La Ilustración Anexo.3 muestra las mismas curvas del acuífero de la Ilustración Anexo.1, donde se obtienen los siguientes datos:

Acuífero A (Uniforme):  $d_{85} = 0.23$ ,  $d_{50} = 0.135$ , coeficiente de uniformidad = 2.78



Realizando las operaciones indicadas:

$$d_{50} \text{ filtro} = (d_{85} \text{ acuífero}) (4) = 0.23 (4) = 0.92$$

$$d_{50} \text{ filtro} = (d_{50} \text{ acuífero}) (16) = 0.135 (16) = 2.16$$

Se toma el  $d_{50}$  menor, que es igual a 0.92, y con centro en este valor se construye una curva con un coeficiente de uniformidad menor o igual a 3. En la curva de filtro:  $d_{60} = 1.10$  y  $d_{10} = 0.37$ .

Acuífero B (No uniforme):  $d_{85} = 1.9$ ,  $d_{50} = 0.59$ , coeficiente de uniformidad = 5.2

Realizando las operaciones indicadas:

$$d_{50} \text{ filtro} = (d_{85} \text{ acuífero}) (4) = 1.9 (4) = 7.6$$

$$d_{50} \text{ filtro} = (d_{50} \text{ acuífero}) (10) = 0.59 (10) = 5.9$$

Se toma el  $d_{50}$  menor, que es igual a 5.9, y con centro en este valor se construye una curva con

un coeficiente de uniformidad no mayor de 3. En la curva de filtro  $d_{60} = 7.0$  y  $d_{10} = 2.36$ .

### A.3.4. MÉTODO DE KRUSE (MODIFICADO)

Este método se basa principalmente en la relación entre los tamaños de granos para el filtro y el acuífero en sus  $d_{50}$ , los valores de esta relación (F/A) se deben escoger según las características del acuífero y del filtro granular, que a continuación se presentan, ver Tabla Anexo.10.

Una vez escogida la relación F/A se multiplica por el  $d_{50}$  del acuífero, obteniendo el tamaño del  $d_{50}$  del filtro granular.

Si el filtro es no uniforme se utiliza como centro el  $d_{50}$  y se construye la gráfica del filtro, cuyo

Tabla Anexo.10

Acuífero	Filtro Granular	Valor Máximo de F/A
Uniforme	Uniforme	9.5
No uniforme	Uniforme	13.5
Uniforme	No Uniforme	13.5
No uniforme	No Uniforme	17.5

coeficiente de uniformidad no excederá de 3.

Si es uniforme, se elige, con quien suministre el filtro de grava, las mallas que se acerquen más al  $d_{50}$  obtenido; una con un diámetro de abertura mayor y otra menor.

En la Ilustración Anexo.4 se muestran dos ejemplos de filtros calculados por el método de Kruse:

Acuífero A (Uniforme):  $d_{50} = 0.135$ ,  
coeficiente de uniformidad = 2.78

Para un filtro uniforme el valor máximo de F/A

Ilustración Anexo.4 Método de Kruse

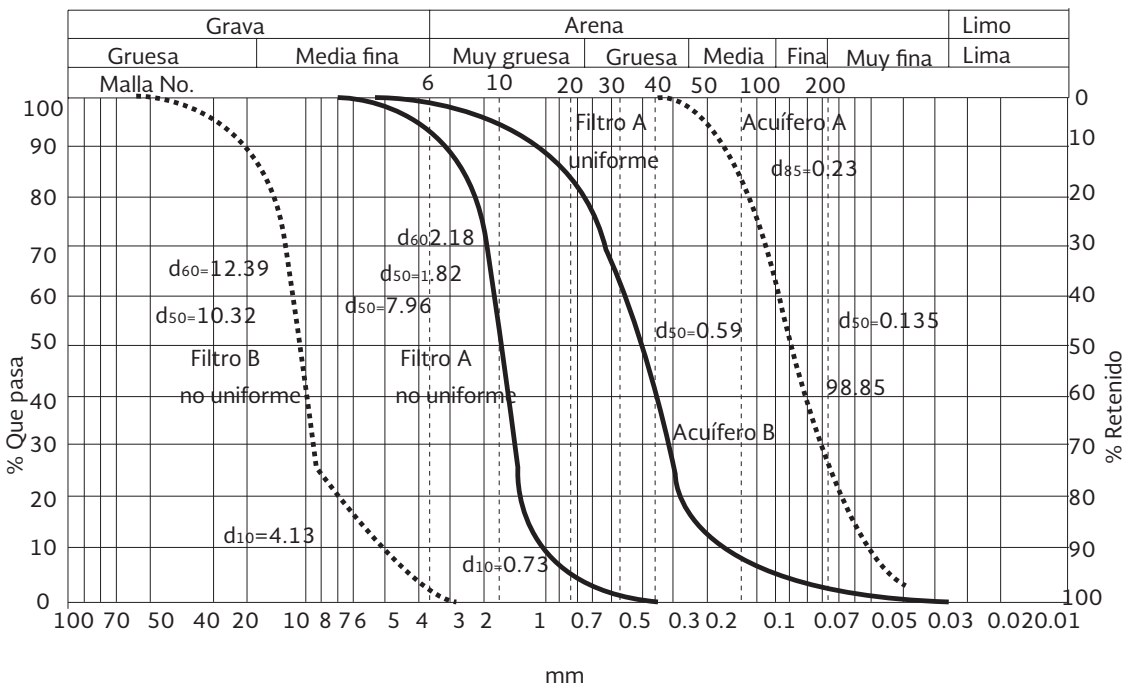
es de 9.5, por lo tanto:

$$d_{50} \text{ filtro} = (d_{50} \text{ acuífero}) (9.5) = 0.135 (9.5) = 1.3$$

Para un filtro no uniforme el valor máximo de F/A es de 13.5, por lo tanto:

$$d_{50} \text{ filtro} = (d_{50} \text{ acuífero})(13.5) = 0.135 (13.5) = 1.82$$

Con centro en  $d_{50}$  se construye una curva cuyo coeficiente de uniformidad no exceda de 3. En el ejemplo:  $d_{60} = 2.18$  y  $d_{10} = 0.73$



Acuífero B (No uniforme):  $d_{50} = 0.59$ ,  
 coeficiente de uniformidad = 5.2

Para un filtro uniforme el valor máximo de F/A es de 13.5, por lo tanto:

$$d_{50} \text{ filtro} = (d_{50} \text{ acuífero}) (13.5) = 0.59 (9.5) = 7.96$$

Para un filtro no uniforme el valor máximo de F/A es de 17.5, por lo tanto:

$$d_{50} \text{ filtro} = (d_{50} \text{ acuífero}) (17.5) = 0.59 (17.5) = 10.32$$

Con centro en  $d_{50}$  se construye una curva cuyo coeficiente de uniformidad no exceda de 3. En el ejemplo:  $d_{60} = 12.39$  y  $d_{10} = 4.13$

### A.3.5. MÉTODO DE STOW

El método de Stow obtiene la curva del filtro granular a partir de los siguientes cálculos:

$$d_{85} \text{ filtro} - (d_{85} \text{ acuífero}) (5)$$

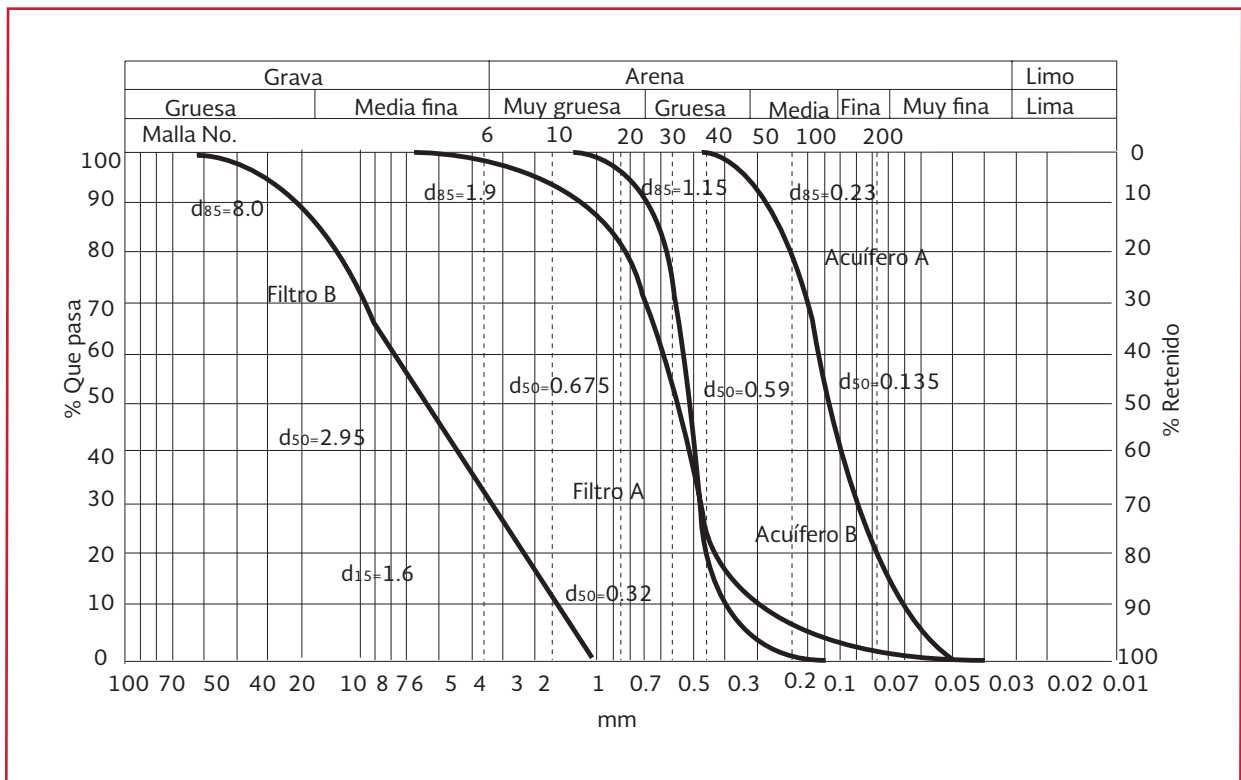
$$d_{50} \text{ filtro} (d_{50} \text{ acuífero}) (5)$$

$$d_{15} \text{ filtro} (d_{15} \text{ acuífero}) (5)$$

Además, la relación  $(d_{95}/d_{15})$  del filtro debe ser menor a 5, si esta relación es mayor a 5, hay que ajustar el  $d_{95}$  y  $d_{15}$  para reducir la relación hasta el límite permitido.

En la Ilustración Anexo.5 se muestran dos ejemplos del método de Stow:

Ilustración Anexo.5 Método de Stow



Acuífero A:  $d_{95} = 0.23$ ,  $d_{50} = 0.135$  y  $d_{15} = 0.064$

Los puntos del Filtro para el acuífero A serán entonces:

$$d_{85} \text{ filtro} = (d_{85} \text{ acuífero}) (5) = 0.230 (5) = 1.150$$

$$d_{50} \text{ filtro} = (d_{50} \text{ acuífero}) (5) = 0.135 (5) = 0.675$$

$$d_{15} \text{ filtro} = (d_{15} \text{ acuífero}) (5) = 0.064 (5) = 0.320$$

Calculando la relación  $d_{95} / d_{15} = 0.23 / 0.064 = 3.6$ , siendo ésta menor a 5 no hay que ajustar. Una vez que se calculan estos tres puntos se grafica la curva del filtro A, que tiene una forma de "S", invertida.

Acuífero B:  $d_{95} = 1.9$ ,  $d_{50} = 0.59$  y  $d_{15} = 0.19$

Los puntos del Filtro para el acuífero A serán entonces:

$$d_{85} \text{ filtro} = (d_{85} \text{ acuífero}) (5) = 1.90 (5) = 9.50$$

$$d_{50} \text{ filtro} = (d_{50} \text{ acuífero}) (5) = 0.59 (5) = 2.95$$

$$d_{15} \text{ filtro} = (d_{15} \text{ acuífero}) (5) = 0.19 (5) = 0.95$$

Calculando la relación  $d_{85} / d_{15} = 9.5 / 0.95 = 10$ , siendo ésta mayor a 5 hay que ajustar, disminuyendo  $d_{85}$  a 8.0 y aumentando  $d_{15}$  a 1.60.

Una vez que se calculan estos tres puntos se grafica la curva del filtro B, que tiene una forma de "S", invertida.

### A.3.6. MÉTODO DE JOHNSON

El Método de Johnson, al igual que el de Stow, da como resultado una curva granulométrica del filtro, pero con mayor holgura para elegir los tamaños y porcentajes de los granos, por medio de franjas de seguridad.

Los pasos a seguir para el cálculo de la curva granulométrica son:

El  $d_{30}$  del acuífero se multiplica por un factor variable entre 4 y 9, dependiendo de las características del acuífero, de acuerdo a las siguientes condiciones, ver Tabla Anexo.11:

El punto así obtenido será el primero de la curva granulométrica del filtro y corresponde a su  $d_{30}$ .

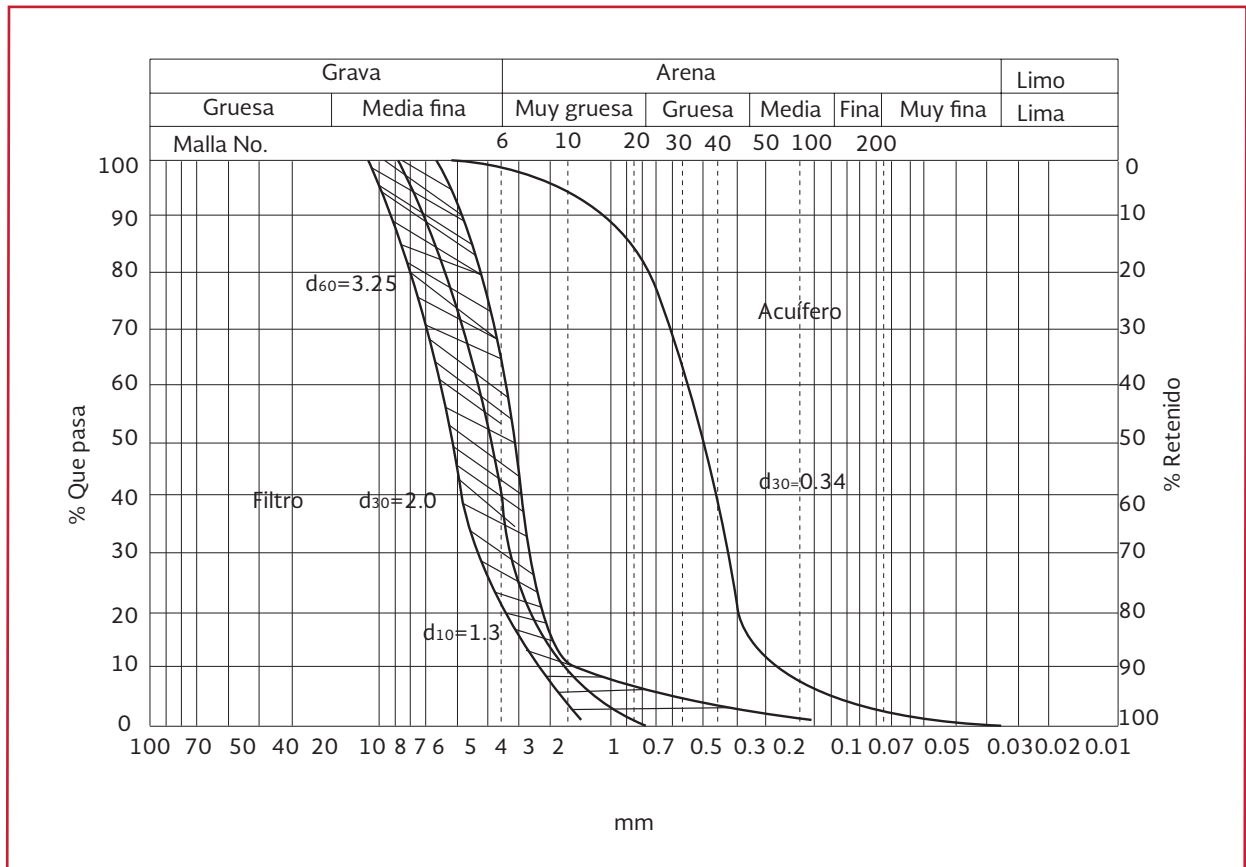
Utilizando este punto como pivote, se traza por tanteos una curva suave con un coeficiente de uniformidad ( $d_{60} / d_{10}$ ) igual o menor a 2.5. Con 4 ó 5 tamaños dentro de la curva se especifica el filtro granular, dándose tolerancias al porcentaje retenido en cada malla de más o menos 8 por ciento.

En el ejemplo de la Ilustración Anexo.6 el acuífero tiene un  $d_{30} = 0.34$ , de la observación de la curva granulométrica se concluye que el material es grueso y no uniforme con muy bajo contenido de limo, por lo que el factor a multiplicar será 6.

$$d_{30} \text{ filtro} = (d_{30} \text{ acuífero}) (6) = 0.34 (6) = 2.04$$

Tabla Anexo.11

Factor	Características del acuífero
4	Material de la formación fino uniforme.
6	Material de la formación más grueso no uniforme.
Entre 6 y 9	Formación acuífera de granulometría muy poco uniforme y contiene limo



Obtenido este valor se pivotea, obteniendo un coeficiente de uniformidad no mayor de 2.5, obteniendo como valores  $d_{60} = 3.25$  y  $d_{10} = 1.3$ , con un coeficiente de uniformidad =  $3.25/1.3 = 2.5$ , una vez que se calculan estos tres puntos, se grafica la curva del filtro, que tiene una forma de "S" invertida.

A los lados de ésta, con un + y - 8 por ciento, se grafican dos líneas que serán las franjas de seguridad.

Cualquier filtro que tenga una curva granulométrica que se encuentre entre las franjas de seguridad será aceptado como bueno.

#### A.4. EFICIENCIA DE POZOS

C.E. Jacob en 1950 había propuesto la misma fórmula que en 1953 planteó Rorabaugh, y fijaba  $n = 2$ :

$$S_p = BQ + CQ^2 \quad \text{Ecuación A.1}$$

Con esta variante, el sistema puede resolverse con sólo dos pares de datos y si se tienen más, se pueden emplear como comprobación.

$$S_1 = BQ_1 + CQ_1^2$$

$$S_2 = BQ_2 + CQ_2^2 \quad \text{Ecuación A.2}$$



El sistema de ecuaciones se puede resolver gráficamente, presentando  $S/Q$  en función de  $Q$ :

$$S_1/Q_1 = B + CQ_1$$

$$S_2/Q_2 = B + CQ_2 \quad \text{Ecuación A.3}$$

y trazando la recta que pasa por los dos puntos representados por los pares de datos. La pendiente de esta recta representa el valor de  $C$  y la ordenada al origen el valor de  $B$ . Si se cuenta con otros pares de puntos se pueden graficar para verificar si se ajustan a ella, corroborándose que  $n = 2$  es un supuesto correcto, como se muestra en la Ilustración Anexo.7, donde a partir de una prueba de bombeo se obtuvieron los datos que se presentan a continuación ver Tabla Anexo.12:

Al graficar la línea recta con los dos primeros puntos se observa que el punto donde se inter-

cepta con el eje  $Y$  es  $0.00500$  que es el valor de  $B$ .

Para calcular la pendiente (metros) de la recta se utiliza la siguiente fórmula:

$$m = (Y_2 - Y_1) / (X_2 - X_1) \quad \text{Ecuación A.4}$$

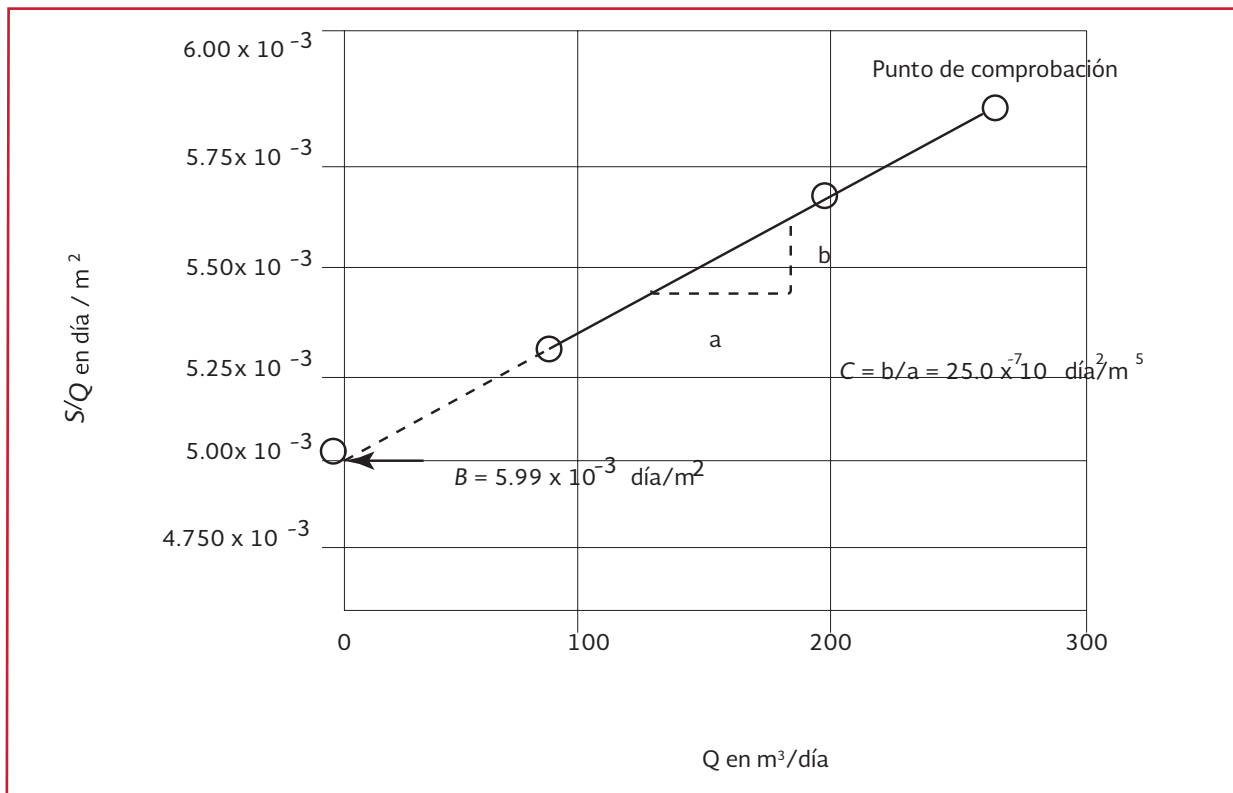
$$= (0.0055 - 0.00525) / (2000 - 100) = 0.0000025 = 25 \times 10^{-7}$$

Este valor de la pendiente es el coeficiente  $C$ , quedando la fórmula como:

$$Sp = 0.005Q + 0.0000025Q^2 \quad \text{Ecuación A.5}$$

Como comprobación se inserta el punto tres dentro de la gráfica, observándose que éste se ajusta en la recta, Lo que confirma que la suposición de que  $n = 2$  es correcta.

Ilustración Anexo.7 Método de Jacob para la determinación de los valores de  $B$  y  $C$



### A.4.1. TANTEOS DE N

Despejando las ecuaciones y considerando  $S/Q$  como una función de  $Q^{n-1}$

$$S_1/Q_1 = B + CQ_1^{(n-1)}$$

$$S_2/Q_2 = B + CQ_2^{(n-1)}$$

$$S_3/Q_3 = B + CQ_3^{(n-1)} \quad \text{Ecuación A.6}$$

Si se grafica  $S/Q$  en función de  $Q^{n-1}$  (Ilustración Anexo.8), se obtiene una recta de pendiente  $C$  y ordenada al origen  $B$ . Para lograr esto se en-

sayan distintos valores de  $n$ , hasta lograr que se alinien los puntos; este método es impreciso, puesto que distintos valores de  $n$  harán parecer la gráfica como una recta, pero es evidente que en la realidad sólo uno es el correcto. Como se muestra en el siguiente ejemplo, donde se graficaron los valores :

Descenso (S) metros	Caudal (Q) (m <sup>3</sup> /d)	Descenso /Caudal (S/Q)(d/m <sup>2</sup> )
4.1	1728	0.00237269
10.1	3456	0.00292245
19.1	5184	0.00368441

Ilustración Anexo.8 Método de Jhonson

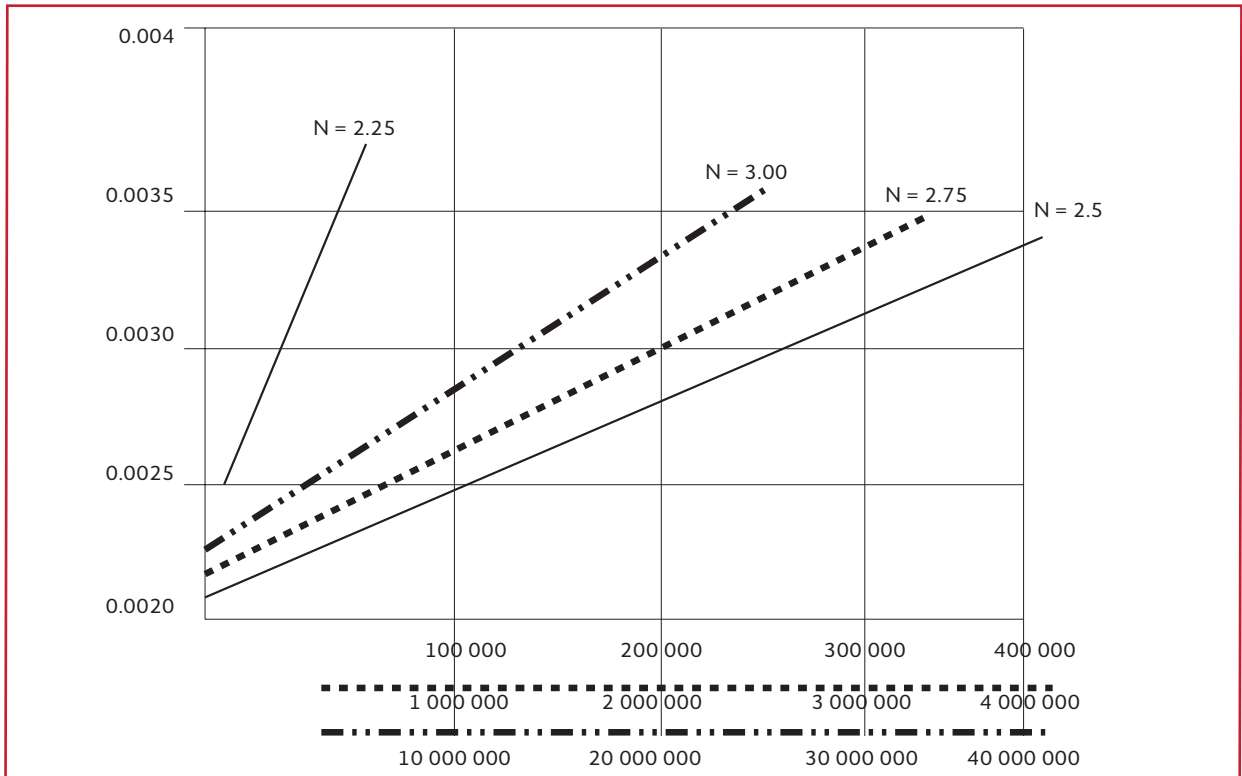
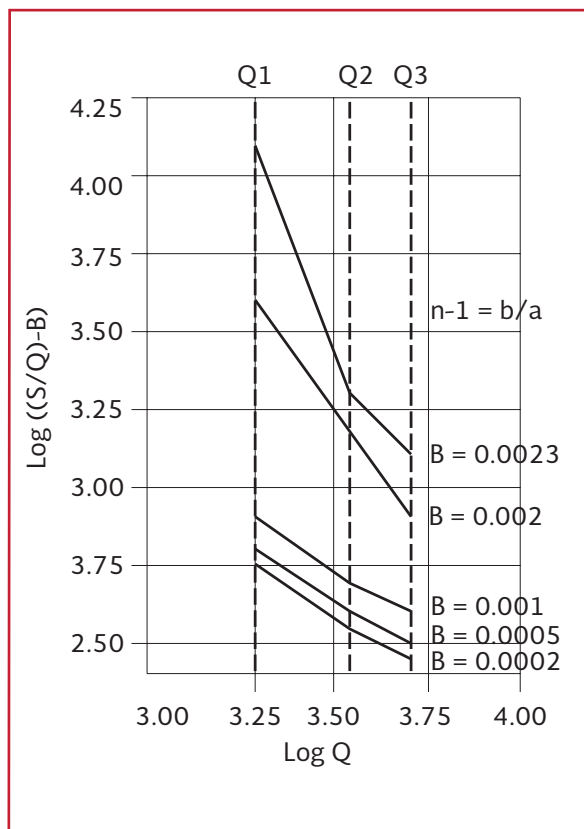


Tabla Anexo.12

Descenso ( $S_p$ ) en m.	Caudal (Q) en m <sup>3</sup> /día eje X	$S_p / Q$ en día/m <sup>2</sup> eje Y
0.525	100	0.005250
1.100	200	0.005500
1.730	300	0.005767

Ilustración Anexo.9 Determinación del valor de  $n$  por tanteo de  $B$



Calculando varios valores de  $n$  (2.25, 2.50, 2.75 y 3.00) en la función  $Q^{n-1}$ , y graficada con respecto a  $S/Q$  se obtiene la Ilustración Anexo.9, donde el eje de las  $X$  contiene varias escalas.

De las 4 rectas sólo se aprecia un ligero quiebre en  $n = 2.25$  y  $n = 3.00$ , quedando por esto descartadas, lo que no da un valor aproximado de  $n$  por el intervalo de variación que se presenta, pero sí da una idea del valor de  $B$ , pues al prolongar las rectas resulta que aproximadamente todas cruzan al eje  $Y$  en un intervalo de 0.0020 a 0.0023.

#### A.4.2. OTRO MÉTODO GRÁFICO

Este método consiste en despejar cada una de las ecuaciones que resultan al considerar los distintos pares de datos en:

$$(S/Q) - B = CQ^{n-1} \quad \text{Ecuación A.7}$$

Tomando logaritmos en ambos miembros de la Ecuación 0.7 se tiene:

$$\log((S/Q) - B) = (n-1)\log Q + \log C \quad \text{Ecuación A.8}$$

Se grafica el valor absoluto de  $\log((S/Q) - B)$  en función de  $\log Q$ , se observa que el resultado de  $((S/Q) - B)$  solamente puede ser positivo, y se obtiene una recta de pendiente  $(n-1)$  que como al eje de ordenadas en el valor de  $C$ . Para lograr esto hay que ensayar distintos valores de  $B$  hasta conseguir que los puntos queden alineados en una recta donde:

$$X = \log((S/Q) - B) \quad \text{Ecuación A.9}$$

$$Y = \log Q \quad \text{Ecuación A.10}$$

Usando los valores del ejemplo de A.4.1, se obtiene la Ilustración Anexo.9, donde se ensayan valores de  $B = 0.0023, 0.0021, 0.001, 0.0005$  y  $0.0002$ ; si se hubiera combinado con el método anterior, sólo habría que probar con valores entre 0.002 y 0.0023, lo que constituye la utilidad del método de tanteos de  $n$ . De la familia de líneas, se obtiene una línea recta cuando  $B = 0.0021$ . Tomando a éste como valor real. Se calcula la pendiente (metros) de esta línea, que es igual a  $n-1$ , por medio de la fórmula:

$$m = (Y_2 - Y_1) / (X_2 - X_1) = (3.084 - 3.564) / ((3.538) - (-3.237)) = 1.6 = n-1$$

De donde  $n = 2.6$ ,  $C$  es fácil de calcular, despejando alguna de las ecuaciones, quedando la fórmula de Rorabaugh como:

$$S = 0.0021 Q + 1.35 \times 1.0^{-9} Q^{2.6}$$

nociéndose al acercarse a la constante A, y despejando B y C, de las ecuaciones anteriores (Ecuación 0.12), se encuentran todas las incógnitas.

#### A.4.3. MÉTODO ANALÍTICO DEL VALOR DE N

$$S_1 = BQ_1 + CQ_1^n$$

$$S_2 = BQ_2 + CQ_2^n$$

$$S_3 = BQ_3 + CQ_3^n \quad \text{Ecuación A.11}$$

Se elimina B y C en el sistema de ecuaciones, quedando:

$$\frac{\left(\frac{S_3}{Q_3}\right) - \left(\frac{S_1}{Q_1}\right)}{\left(\frac{S_2}{Q_2}\right) - \left(\frac{S_1}{Q_1}\right)} = \frac{Q_3^{n-1} - Q_1^{n-1}}{Q_2^{n-1} - Q_1^{n-1}} = A$$

Ecuación A.12

Sustituyendo distintos valores de n, se puede hallar el que satisfaga mejor la Ecuación 0.11, reco-

Ejemplo: A partir de los datos de aforo del ejemplo del inciso A.4.1:

$$\frac{\left(\frac{S_3}{Q_3}\right) - \left(\frac{S_1}{Q_1}\right)}{\left(\frac{S_2}{Q_2}\right) - \left(\frac{S_1}{Q_1}\right)} = \frac{0.00131172}{0.00054976} = 2.386$$

Iteración del valor de n. Ver Tabla Anexo.13

Tabla Anexo.13

n	2.25	2.5	2.75	2.6	2.634
$Q_1^{n-1}$	11 141.14	71 831.6	463 128.5	151 380.5	195 050.0
$Q_2^{n-1}$	26 498.25	203 170.4	1 557 772.5	458 900.0	605 382.0
$Q_3^{n-1}$	43 987.70	373 248.0	3 167 114.0	877 938.2	1 174 255.5
A	2.1388	2.2949	2.4701	2.3626	2.3863

$$A = \frac{Q_3^{n-1} - Q_1^{n-1}}{Q_2^{n-1} - Q_1^{n-1}}$$

Ecuación A.15

Como A = 2.3863 es muy parecido a 2.386 obtenido anteriormente, el valor de n será de 2.634, despejando C nos queda:

$$C = \frac{\left(\frac{S_3}{Q_3}\right) - \left(\frac{S_1}{Q_1}\right)}{Q_3^{n-1} - Q_1^{n-1}} = \frac{0.00131172}{972205.257} = 1.3396 \times 10^{-9}$$

y por último despejando B:

$$B = (S_1 - C Q_1^n) / Q = 3.6485 / 1728 = 0.002114$$

#### A.4.4. MÉTODO ANALÍTICO DEL VALOR DE B

A partir de:

$$\begin{aligned} S_1 &= BQ_1 + C Q_1^n \\ S_2 &= BQ_2 + C Q_2^n \\ S_3 &= BQ_3 + C Q_3^n \end{aligned} \quad \text{Ecuación A.11}$$

Se elimina  $n$  y  $C$  en el sistema de ecuaciones y considerando que  $((S/Q) - B) > 0$ , se tiene:

$$\frac{\log\left(\frac{Q_3}{Q_1}\right)}{\log\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)} = \frac{\log\left(\left(\frac{S_3}{Q_3}\right) - B\right) - \log\left(\left(\frac{S_1}{Q_1}\right) - B\right)}{\log\left(\left(\frac{S_2}{Q_2}\right) - B\right) - \log\left(\left(\frac{S_1}{Q_1}\right) - B\right)} E$$

Ecuación A.12

Sustituyendo distintos valores de  $B$  se puede hallar el que satisfaga mejor la Ecuación 0.12, reconociéndose al acercarse a la constante  $E$ , calculándose  $n$  por medio de la siguiente fórmula:

$$n = \frac{\log\left(\left(\frac{S_3}{Q_3}\right) - B\right) - \log\left(\left(\frac{S_1}{Q_1}\right) - B\right)}{\log\left(\frac{Q_3}{Q_1}\right)} + 1$$

Ecuación A.16

Y despejando  $C$  de cualquiera de las ecuaciones de Rorabaugh, se obtiene:

$$C = \frac{S_1 - BQ_1}{Q_1^n} \quad \text{Ecuación A.17}$$

Ejemplo: A partir de los datos del aforo del inciso A.4.1.:

$$E = \frac{\log\left(\frac{Q_3}{Q_1}\right)}{\log\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)} = \frac{0.47712}{0.30103} = 1.5849$$

Iteración del valor de  $B$ . Ver Tabla Anexo.14

$$E = \frac{\log\left(\left(\frac{S_3}{Q_3}\right) - B\right) - \log\left(\left(\frac{S_1}{Q_1}\right) - B\right)}{\log\left(\left(\frac{S_2}{Q_2}\right) - B\right) - \log\left(\left(\frac{S_1}{Q_1}\right) - B\right)}$$

Ecuación A.12

Como el valor de  $E$  para  $B = 0.002111$  es casi idéntico al obtenido anteriormente, se toma como válido, despejando  $n$ :

$$\begin{aligned} n &= \frac{\log\left(\left(\frac{S_3}{Q_3}\right) - B\right) - \log\left(\left(\frac{S_1}{Q_1}\right) - B\right)}{\log\left(\frac{Q_3}{Q_1}\right)} + 1 \\ &= \frac{0.77974}{0.47712} + 1 = 2.6342 \end{aligned}$$

$$C = (S_1 - B Q_1) / (Q_1^n) = 0.451328 / 337,738,414 = 1.3363 \times 10^{-9}$$

Tabla Anexo.14

B	0.001	0.002	0.0023	0.0021	0.002111
log ((S/Q -B))	-2.86242	-3.42865	-4.13852	-3.56433	-3.58304
log ((S/Q -B))	-2.71614	-3.03505	-3.20589	-3.08489	-3.09100
log ((S/Q -B))	-2.57115	-2.77355	-2.85873	-2.80013	-2.80329
E	1.99119	1.66440	1.37223	1.59393	1.58473

# TABLA DE CONVERSIONES DE UNIDADES DE MEDIDA

Sigla	Significado	Sigla	Significado
mg	miligramo	kg/m <sup>3</sup>	kilogramo por metro cúbico
g	gramo	l/s	litros por segundo
kg	kilogramo	m <sup>3</sup> /d	metros cúbicos por día
mm	milímetro	Sm <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup>	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 <sup>2</sup> = 100 mm <sup>2</sup>	0.15	in <sup>2</sup>
1 m <sup>2</sup> = 10 000 cm <sup>2</sup>	1.19	yd <sup>2</sup>
1 hectárea (ha) = 10 000 m <sup>2</sup>	2.47	acres
1 km <sup>2</sup> = 100 ha	0.38	mi <sup>2</sup>
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 in <sup>2</sup>	6.45	cm <sup>2</sup>
1 ft <sup>2</sup> = 144 in <sup>2</sup>	0.09	m <sup>2</sup>
1 yd <sup>2</sup> = 9 ft <sup>2</sup>	0.83	m <sup>2</sup>
1 acre = 4 840 yd <sup>2</sup>	4 046.90	m <sup>2</sup>
1 milla <sup>2</sup> = 640 acres	2.59	km <sup>2</sup>

## Volumen/capacidad

Sistema métrico	Sistema inglés	Siglas
1 cm <sup>3</sup>	0.06	in <sup>3</sup>
1 dm <sup>3</sup> = 1 000 cm <sup>3</sup>	0.03	ft <sup>3</sup>
1 m <sup>3</sup> = 1 000 dm <sup>3</sup>	1.30	yd <sup>3</sup>
1 litro (L) = 1 dm <sup>3</sup>	1.76	pintas
1 hectolitro (hL) = 100 L	21.99	galones
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 in <sup>3</sup>	16.38	cm <sup>3</sup>
1 ft <sup>3</sup> = 1 728 in <sup>3</sup>	0.02	m <sup>3</sup>
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

$$^{\circ}C = \frac{5}{9}(^{\circ}F - 32)$$

$$^{\circ}F = \frac{9}{5}(^{\circ}C) + 32$$

Otros sistemas de unidades		Multiplicado por	Sistema Internacional de Unidades (SI)	
Unidad	Símbolo	Factor de conversión	Se convierte a	
<b>Longitud</b>				
Pie	pie, ft.,'	0.30	metro	m
Pulgada	plg, in,"	25.40	milímetro	mm
<b>Presión/esfuerzo</b>				
Kilogramo fuerza/cm <sup>2</sup>	kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	98 066.50	pascal	Pa
Libra/pulgada <sup>2</sup>	lb/ plg <sup>2</sup> , PSI	6 894.76	pascal	Pa
atmósfera técnica	at	98 066.50	pascal	Pa
metro de agua	m H <sub>2</sub> O (mca)	9 806.65	pascal	Pa
mm de mercurio	mm Hg	133.32	pascal	Pa
bar	bar	100 000.00	pascal	Pa
<b>Fuerza/ peso</b>				
kilogramo fuerza	kg <sub>f</sub>	9.80	newton	N
<b>Masa</b>				
libra	lb	0.45	kilogramo	kg
onza	oz	28.30	gramo	g
<b>Peso volumétrico</b>				
kilogramo fuerza/m <sup>3</sup>	kg <sub>f</sub> /m <sup>3</sup>	9.80	N/m <sup>3</sup>	N/m <sup>3</sup>
libra /ft <sup>3</sup>	lb/ft <sup>3</sup>	157.08	N/m <sup>3</sup>	N/m <sup>3</sup>
<b>Potencia</b>				
caballo de potencia	CP, HP	745.69	watt	W
caballo de vapor	CV	735.00	watt	W
<b>Viscosidad dinámica</b>				
poise	μ	0.01	pascal segundo	Pa s
<b>Viscosidad cinemática</b>				
viscosidad cinemática	v	1	stoke	m <sup>2</sup> /s (St)
<b>Energía/ Cantidad de calor</b>				
caloría	cal	4.18	joule	J
unidad térmica británica	BTU	1 055.06	joule	J
<b>Temperatura</b>				
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/s<sup>2</sup>



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 <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	ha	mi <sup>2</sup>	acre	ft <sup>2</sup>	in <sup>2</sup>
cm <sup>2</sup>	1.00						0.001	0.155
m <sup>2</sup>	10 000.00	1.00					10.764	1 550.003
km <sup>2</sup>			1.000	100.000	0.386	247.097		
ha		10 000.00	0.010	1.000	0.004	2.471		
mi <sup>2</sup>			2.590	259.000	1.000	640.000		
acre		4 047.00	0.004	0.405	0.002	1.000		
ft <sup>2</sup>	929.03	0.09					1.000	0.007
in <sup>2</sup>	6.45						144.000	1.000

Volumen								
de / a	cm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	L	ft <sup>3</sup>	gal. EUA	acre-ft	in <sup>3</sup>	yd <sup>3</sup>
cm <sup>3</sup>	1.000		0.001				0.061	
m <sup>3</sup>		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 <sup>3</sup>		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 <sup>3</sup>	16.387		0.016		0.004		1.000	
Yd <sup>3</sup>		0.765		27.000				1.000

Gasto								
de / a	l/s	cm <sup>3</sup> /s	gal/día	gal/min	l/min	m <sup>3</sup> /día	m <sup>3</sup> /h	ft <sup>3</sup> /s
l/s	1.000	1 000.000		15.851	60.000	86.400	3.600	0.035
cm <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /día	0.012	11.570	264.550	0.183	0.694	1.000	0.042	
m <sup>3</sup> /h	0.278		6 340.152	4.403	16.667	24.000	1.000	0.010
ft <sup>3</sup> /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 <sup>2</sup>	millones gal/día/acre	m/día	pie/s	Darcy
cm/s		1.000	21 204.78		864.000	0.033	
gal/día/pie <sup>2</sup>			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 <sup>2</sup>	lb/in <sup>2</sup>	mm de Hg	in de Hg	m de H <sub>2</sub> O	ft de H <sub>2</sub> O
atmósfera		1.000	1.033	14.696	760.000	29.921	10.330	33.899
kg/cm <sup>2</sup>		0.968	1.000	14.220	735.560	28.970	10.000	32.810
lb/in <sup>2</sup>		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 <sup>2</sup> /s	gal/día/pie	m <sup>2</sup> /día
cm <sup>2</sup> /s		1.000	695.694	8.640
gal/día/ft		0.001	1.000	0.012
m <sup>2</sup> /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	$^{\circ}\text{C}=5/9 (^{\circ}\text{F}-32)$
Réaumur 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	eppm a ppm	ppm a epm	eppm a gpg	gpg a epm	ppm a ppm CaCO <sub>3</sub>
calcio Ca <sup>+2</sup>	20.04	0.04991	1.1719	0.8533	2.4970
hierro Fe <sup>+2</sup>	27.92	0.03582	1.6327	0.6125	1.7923
magnesio Mg <sup>+2</sup>	12.16	0.08224	0.7111	1.4063	4.1151
potasio K <sup>+1</sup>	39.10	0.02558	2.2865	0.4373	1.2798
sodio Na <sup>+1</sup>	23.00	0.04348	1.3450	0.7435	2.1756
bicarbonato (HCO <sub>3</sub> ) <sup>-1</sup>	61.01	0.01639	3.5678	0.2803	0.8202
carbonato (CO <sub>3</sub> ) <sup>-2</sup>	30.00	0.03333	1.7544	0.5700	1.6680
cloro (Cl) <sup>-1</sup>	35.46	0.02820	2.0737	0.4822	1.4112
hidróxido (OH) <sup>-1</sup>	17.07	0.05879	0.9947	1.0053	2.9263
nitrate (NO <sub>3</sub> ) <sup>-1</sup>	62.01	0.01613	3.6263	0.2758	0.8070
fosfato (PO <sub>4</sub> ) <sup>-3</sup>	31.67	0.03158	1.8520	0.5400	1.5800
sulfato (SO <sub>4</sub> ) <sup>-2</sup>	48.04	0.02082	2.8094	0.3559	1.0416
bicarbonato de calcio Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	805.00	0.01234	4.7398	0.2120	0.6174
carbonato de calcio (CaCO <sub>3</sub> )	50.04	0.01998	2.9263	0.3417	1.0000
cloruro de calcio (CaCl <sub>2</sub> )	55.50	0.01802	3.2456	0.3081	0.9016
hidróxido de calcio Ca(OH) <sub>2</sub>	37.05	0.02699	2.1667	0.4615	1.3506
sulfato de calcio (CaSO <sub>4</sub> )	68.07	0.01469	3.9807	0.2512	0.7351
bicarbonato férrico Fe(HCO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	88.93	0.01124	5.2006	0.1923	0.5627
carbonato férrico Fe <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	57.92	0.01727	3.3871	0.2951	0.8640
sulfato férrico Fe <sub>2</sub> (CO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	75.96	0.01316	4.4421	0.2251	0.6588
bicarbonato magnésico Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	73.17	0.01367	4.2789	0.2337	0.6839
carbonato magnésico (MgCO <sub>3</sub> )	42.16	1.02372	2.4655	0.4056	1.1869
cloruro de magnesio (MgCl <sub>2</sub> )	47.62	0.02100	2.7848	0.3591	1.0508
hidróxido de magnesio Mg(OH) <sub>2</sub>	29.17	0.03428	1.7058	0.5862	1.7155
sulfato de magnesio (MgSO <sub>4</sub> )	60.20	0.01661	3.5202	0.2841	0.6312

eppm = equivalentes por millón

ppm = partes por millón

gpg = granos por galón

p.p.m. CaCO<sub>3</sub> = partes por millón de carbonato de calcio



# ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1 Descenso por efectos de bombeo en pozo	3
Ilustración 1.2 Gráfica de bombeos escalonados a partir de una prueba de aforo	5
Ilustración 1.3 Esquema de un pozo con sus componentes básicos. <i>B</i> representa el factor de pérdida en la formación y <i>C</i> el factor por pérdidas en el pozo (Vargas & Arellano, 2002)	7
Ilustración 1.4 Medición de flujo con tubo de pitot (NOM-006-ENER)	10
Ilustración 1.5 Medición de flujo mediante orificio calibrado (NOM-006-ENER)	10
Ilustración 1.6 Medición de flujo por el método de la escuadra (NOM-006-ENER)	11
Ilustración 2.1 Pozos completos e incompletos	17
Ilustración 2.2 Aforo de Pozos	20
Ilustración 2.3 Construcción de pozos	21
Ilustración 2.4 Ademe de un pozo	23
Ilustración 3.1 Trompo para rectificación de ademes	31
Ilustración 3.2 Lavado de ademes	34
Ilustración 3.3 Cepillos con cerdas intercambiables	35
Ilustración 3.4 Pistón solido de caucho	36
Ilustración 3.5 Nivel para el sistema de lavado con aire comprimido	36
Ilustración 3.6 Relación de triángulos semejantes en registros de verticalidad	39
Ilustración 3.7 Desviación permitida en pozos de agua	41
Ilustración 3.8 Desviación permitida en pozos de agua	42
Ilustración 3.9 Bloques de impresión	46
Ilustración 3.10 Prensa electrohidráulica	47
Ilustración 3.11 Profundización de un pozo	49
Ilustración 4.1 incrustación en pozo (Nitana 200, 2008)	53
Ilustración 4.2 Lubricación de la zona de aireación del ademe	61
Ilustración 5.1 Lavado horizontal y pozo abierto	73
Ilustración 5.2 Lavado de pozo con chorro vertical y pozo cerrado	73
Ilustración 5.3 Instalación para desarrollo de pozos por pistoneo.	75
Ilustración 5.4 Pistones para desarrollar pozos	77
Ilustración 5.5 Método de cabezal abierto	78
Ilustración 5.6 Compresor de alta presión para desarrollo neumático	80
Ilustración 5.7 Ejemplo desarrollo neumático a pozo abierto	82
Ilustración 5.8 Ejemplo de desarrollo neumático a pozo cerrado	82
Ilustración 6.1 Curva con posibilidad de calcular el caudal óptimo	85
Ilustración 6.2 La gráfica es recta o casi recta. Se está aforando la bomba. Se debe repetir el aforo	85
Ilustración 6.3 El pozo está en proceso de desarrollo. Se debe repetir el aforo	86



Ilustración 6.4 Después de iniciado el aforo, se inició un proceso de desarrollo. Se debe repetir el aforo	86
Ilustración 6.5 Ejemplo de curva de aforo y caudal óptimo de explotación	87
Ilustración 6.6 Curva abatimiento/caudal	88
Ilustración 6.7 Costo total -caudal	91
Ilustración 6.8 Eficiencia económica-caudal	91
Ilustración 6.9 Transmisividad a partir de la recuperación del pozo (método de Jacob)	93
Ilustración 7.1 Herramienta de pesca (Parte 1)	97
Ilustración 7.2 Herramienta de pesca (Parte 2)	97
Ilustración 7.3 Herramienta de pesca (Parte 3)	99
Ilustración 7.4 Herramienta de pesca (Parte 4)	100
Ilustración 8.1 Filtro de granular	101
Ilustración 8.2 Cedazos para análisis granulométrico	102
Ilustración 8.3 Curva granulométrica	103
Ilustración 8.4 Ademe con abertura sobresaliente	105
Ilustración 8.5 Ademe con ranuras longitudinales rectas	105
Ilustración 8.6 Ranurado sobresaliente	106
Ilustración 8.7 Ranurado longitudinal	107
Ilustración 8.8 Colocación de ademe metálico soldado o tope	108

# TABLAS

Tabla 1.1 Valores mínimos de eficiencia para sistemas de bombeo para pozo profundo en operación	1
Tabla 1.2 Ejemplo de la relación entre el coeficiente $C$ y el estado del pozo	7
Tabla 1.3 Ejemplo de los datos del aforo de un pozo	7
Tabla 1.4 Ejemplo de mediciones previas	14
Tabla 2.1 Causas de ineficiencia de los pozos para agua	16
Tabla 4.1 Serie galvánica (electronegatividad de metales), miliarium (2004)	59
Tabla 5.1 Cloración de pozos	69
Tabla 5.2 Diámetros de rejilla y peso a usar	76
Tabla 5.3 Tamaños recomendados para las tuberías de bombeo y de aire así como las capacidades de bombeo	77
Tabla 6.1 Ejemplo de intervalos de tiempo para lecturas en pozos	85
Tabla 6.2 Ejemplo de análisis costo por año de maquina	90
Tabla 6.3 Ejemplo de tabla de eficiencia económica	91
Tabla 6.4 Ejemplo del cálculo de transmisividad a partir de la recuperación del pozo (método de Jacob)	93
Tabla 8.1 Clasificación de los suelos usada en diferentes países	104
Tabla 8.2 Metales de rejillas y sus aplicaciones	108
Tabla 8.3 Tamaño de la abertura de la ranura	109



