

PERFORACIONES HIDROGEOLÓGICAS

Dr. Geól. Miguel Auge

**PROFESOR TITULAR DE HIDROGEOLOGÍA
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
INVESTIGADOR DEL CONICET**

miguelauge66@gmail.com

PILAR 2005

TEMAS

INTRODUCCIÓN	1
1. CICLO HIDROLÓGICO	2
1.1. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN EL PLANETA	4
1.2. EL AGUA EN ARGENTINA	6
1.3. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN EL SUBSUELO	8
1.4. TIPOS DE ACUÍFEROS	9
2. ACUÍFEROS PAMPEANO Y PUELICHE	11
2.1. RECARGA Y DESCARGA	11
2.2. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS	12
3. SISTEMAS DE PERFORACIÓN	16
3.1. ROTACIÓN CON CIRCULACIÓN DIRECTA	16
3.2. ROTACIÓN CON CIRCULACIÓN INVERSA	17
3.3. PERCUSIÓN A CABLE	18
3.4. ROTOPERCUSIÓN	19
3.5. POZO PILOTO	21
4. DISEÑO DEL POZO DE CAPTACIÓN	24
4.1. DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN	25
4.2. INSTALACIÓN DE LA CAMISA	28
4.3. VERTICALIDAD Y ALINEAMIENTO	32
5. FILTRO	35
5.1. TIPOS DE FILTROS	35
5.2. ELECCIÓN DEL FILTRO	37
5.3. INSTALACIÓN DEL FILTRO	39
5.4. ENGRAVADO	42
6. LIMPIEZA Y DESARROLLO	48
6.1. CHORRO DE ALTA VELOCIDAD	49
6.2. PISTONEO	50
6.3. INYECCIÓN DE AIRE	51
6.4. BOMBEO	52
6.5. CUCHARO	53
6.6. PRODUCTOS QUÍMICOS	53
6.7. CONCLUSIONES	53
6.8. CLORACIÓN	54

6.9. MUESTREO DE AGUA	55
7. ENSAYOS HIDRÁULICOS	56
7.1. CAUDAL UNIFORME	56
7.2. CAUDALÍMETRO	57
7.3. MEDICIONES DE NIVEL	59
7.4. FRECUENCIA DE LOS REGISTROS	59
7.5. EFICIENCIA DEL POZO	60
7.6. CAUDAL CRÍTICO	63
7.7. ELECCIÓN DEL EQUIPO DE BOMBEO	66
8. INFORME TÉCNICO FINAL	69
AGRADECIMIENTOS	72
BIBLIOGRAFÍA	73

FIGURAS

1. CICLO HIDROLÓGICO	2
2. AGUA EN LA TIERRA	5
3. AGUA EN EL SUBSUELO	8
4. AGUA INTRAPORAL	8
5. ACUÍFERO LIBRE	9
6. ACUÍFEROS LIBRE Y CONFINADO	10
7. ACUÍFERO SEMICONFINADO	11
8. ALTERACIÓN POR BOMBEO	12
9. EXTENSIÓN Y ESPESOR ACUÍFERO PUELICHE	13
10. PROFUNDIDAD TECHO ACUÍFERO PUELICHE	14
11. ESPESOR Y PORCENTAJE DE ARENA ACUÍFERO PUELICHE	15
12. EQUIPO ROTATIVO CON CIRCULACIÓN DIRECTA	16
13. EQUIPO ROTATIVO CON CIRCULACIÓN INVERSA	17
14. EQUIPO DE PERCUSIÓN A CABLE	18
15. HERRAMIENTA PARA PERCUSIÓN A CABLE	19
16. EQUIPO DE ROTOPERCUSIÓN	20
17. TRÉPANO PARA ROTOPERCUSIÓN	21
18. PERFILES LITOLÓGICO DE AVANCE Y ELÉCTRICO DE UN POZO PILOTO	22
19. FLUJOS EN LOS ACUÍFEROS PAMPEANO Y PUELICHE (A) Pozo encamisado y cementado (B) Pozo encamisado sin cementar (C) Pozo sin encamisado ni cementación (D) Pozo parcialmente encamisado sin cementación	27
20. CEMENTACIÓN POR INMERSIÓN DE LA CAMISA	29

21. CEMENTACIÓN POR INYECCIÓN A TRAVÉS DE TUBERÍA	30
22. ACOPLE DE UNA CAMISA CON EXTREMOS ROSCADOS	30
23. (A) ACOPLE DE UNA CAMISA MEDIANTE SOLDADURA	31
(B) PRIMER RELLENO DE SOLDADURA	31
24. EQUIPAMIENTO PARA MEDIR LA DESVIACIÓN DEL POZO	32
25. GRÁFICO DESVIACIÓN - PROFUNDIDAD	33
26. FILTRO RANURADO A SOPLETE	35
27. FILTRO PERSIANA O CELOSÍA	36
28. (A) ENROLLADO DEL FILAMENTO EN UN FILTRO DE RANURA CONTINUA	36
(B) DETALLE DE UN FILTRO DE RANURA CONTINUA	37
29. COLOCACIÓN DEL FILTRO Y LA GRAVA CON CAÑERÍA DE MANIOBRA	40
30. DIÁMETRO DEL POZO PARA LOGRAR UN BUEN ENGRAVADO	40
31. DIÁMETRO DEL POZO AMPLIADO CON UN ENSANCHADOR	41
32. (A) ENTUBAMIENTO PREVIO AL ENGRAVADO Y LA CEMENTACIÓN	41
(B) POZO TERMINADO ENGRAVADO Y CEMENTADO	41
33. MUESTREADOR A ÉMBOLO PARA ARENA Y GRAVA	43
34. SERIE DE TAMICES PARA ANÁLISIS GRANOMÉTRICOS	44
35. CURVA GRANOMÉTRICA ACUMULATIVA	44
36. ENGRAVADO NATURAL	47
37. FLUJO DE DIRECCIONES CONTRARIAS A TRAVÉS DEL FILTRO	48
38. EYECTOR DE 4 BOQUILLAS PARA DESARROLLO CON JET	49
39. PASAJE DEL CHORRO A TRAVÉS DE LAS REJILLAS	49
40. ÉMBOLO EN POSICIÓN PARA EL PISTONEO	50
41. ÉMBOLO CIEGO	51
42. ÉMBOLO CON VÁLVULAS	51
43 EQUIPO PARA DESARROLLO CON AIRE	52
44. CAUDALÍMETRO CON PLACA ORIFICIO Y TUBO PIEZOMÉTRICO	57
45. GRÁFICO DEL FACTOR DE DESCARGA DEL CAUDALÍMETRO	58
46. SONDA PIEZOMÉTRICA ELÉCTRICA	59
47. GRÁFICO SEMILOGARÍTMICO DEPRESIÓN – TIEMPO	61
48. GRÁFICO CAUDAL – DEPRESIÓN – TIEMPO ENSAYO ESCALONADO	65
49. CURVAS DE RENDIMIENTO DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA IMPULSORA	68

CUADROS

1. AGUA EN LA TIERRA	5
2. EXTRACCIÓN DE AGUA EN EUROPA	6
3. USO DE AGUA EN EL MUNDO	6
4. CONSUMO DE AGUA EN EL CONURBANO	7
5. CAUDALES EN FUNCIÓN DEL Ø DE LA CAMISA Y LA CARGA MANOMÉTRICA	28
6. CAUDALES MÁXIMOS TEÓRICOS PARA FILTROS DE RANURA CONTINUA	38
7. ESPECIFICACIONES DE GRAVAS PARA PREFILTROS	46
8. DIÁMETROS DE TUBERÍAS PARA INYECCIÓN DE AIRE	53
9. CONCENTRACIONES PARA PREPARAR 1 m³ DE SOLUCIÓN CLORADA	54
10. LAVANDINA NECESARIA PARA PREPARAR 1 m³ DE SOLUCIÓN CLORADA	55
11. FRECUENCIA PARA LAS MEDICIONES DEL NIVEL HIDRÁULICO EN UN ENSAYO	60
12. CAUDALES Y NIVELES EN FUNCIÓN DEL TIEMPO EN UN ENSAYO ESCALONADO	64
13. SÍNTESIS DEL INFORME TÉCNICO FINAL DEL POZO	70
	71

INTRODUCCIÓN

Este texto es uno de los productos del Proyecto de Urgencia Social A703 “Indicadores de Salud y Ambiente para un Desarrollo Sustentable de la Infancia”, que desarrolla la Universidad de Buenos Aires, con la colaboración de la Municipalidad del Pilar.

El objetivo es brindar las bases técnicas para la ejecución de perforaciones seguras, destinadas a la captación de agua potable.

El programa consta de 8 puntos:

1. Ciclo hidrológico
2. Acuíferos Pampeano y Puelche
3. Sistemas de perforación
4. Diseño del pozo de captación
5. Instalación del filtro
6. Limpieza y desarrollo
7. Ensayos hidráulicos
8. Informe técnico final

La mayoría de las figuras en blanco y negro, fueron tomadas del libro El Agua Subterránea y los Pozos, editado por Edward Johnson Inc.

El agua subterránea constituye el único recurso hídrico disponible para el abastecimiento de la mayoría de las ciudades, localidades, parajes y sectores rurales de la Provincia de Buenos Aires. En este sentido, sólo los asentamientos ubicados en la vecindad de los ríos Paraná y de la Plata, pueden emplear agua superficial, pero luego de potabilizarla, para cubrir sus necesidades. Por ello, el cuidado del agua contenida en el subsuelo, resulta imprescindible para mantener la calidad de vida de la población que se abastece de ella. En este aspecto la construcción adecuada de los pozos de captación, constituye uno de los factores esenciales para evitar el deterioro por contaminación de los acuíferos más profundos, a partir del más somero (freático).

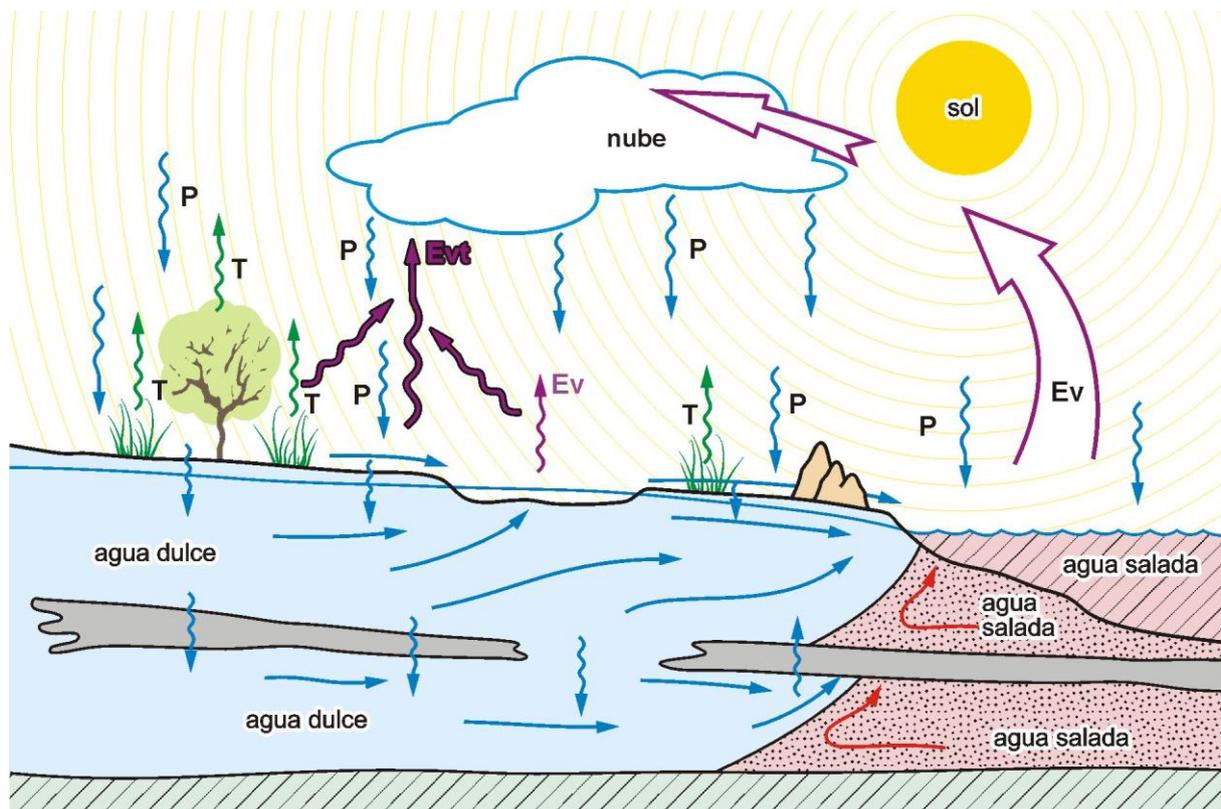
1. CICLO HIDROLÓGICO

Si bien en la actualidad el desarrollo del ciclo hidrológico es conocido por los chicos que estudian en escuelas primarias, su dilucidación llevó alrededor de dos mil años. En efecto, hasta el siglo 17, en que Mariotté y Perrault establecieron que la lluvia caída en la cuenca del Sena era 6 veces mayor que el escurrimiento del río, predominaron las ideas de los griegos (Thales, Platón y Aristóteles) y de los romanos (Lucrecio, Plinio y Séneca) que, con diferentes matices, sostenían que la precipitación no era suficiente para alimentar el caudal de los ríos, y el suelo demasiado impermeable para permitir la infiltración. En virtud de ello, postulaban el origen del agua continental (superficial y subterránea), a partir del ingreso del mar a través de grutas y cavernas subterráneas.

En la figura 1 se reproduce esquemáticamente el funcionamiento del ciclo hidrológico.

Figura 1

CICLO HIDROLÓGICO



Precipitación. Es una de las componentes primarias del ciclo y constituye la variable de entrada de todo sistema hidrológico. Se define como la caída de agua al estado líquido (lluvia) o sólido (nieve).

La precipitación es un fenómeno discontinuo y sumamente variable en el espacio y en el tiempo. De acuerdo a su origen existen 3 tipos de lluvia: **convectiva, frontal o ciclónica y orográfica.**

Evaporación (E). Es la transformación del agua líquida en vapor. $E = K \cdot (e_s - e_d)$ que en definitiva significa que la evaporación es proporcional al déficit higrométrico (diferencia entre la tensión de vapor del aire saturado a la temperatura del agua y la tensión de vapor del aire circundante).

Principal responsable de la **evaporación**, es la energía solar. El viento actúa movilizándolo la masa de aire sobre la superficie sujeta a evaporación e impidiendo su condensación. La evaporación junto con la **transpiración (evapotranspiración Evt)** constituyen variables de significativa importancia hidrológica, siendo frecuentes en muchas partes del mundo valores de **Evt** entre el 60 y 90% de la lluvia. La evaporación se asume como pérdida en la ecuación que sintetiza el balance hidrológico.

$$P = Ev + Es + I$$

P: precipitación Ev: evaporación Es: escurrimiento superficial I: Infiltración

La evaporación de un suelo sin vegetación se produce en la capa superficial, lo que genera un desequilibrio y el ascenso de agua más profunda por capilaridad. Si el suelo está saturado y desnudo, la evaporación es mayor que si está cubierto con vegetación.

Transpiración (Tr). Proceso físico – biológico por el que el agua líquida se vaporiza por acción del metabolismo de las plantas. El agua del suelo penetra por los pelos absorbentes de las raíces debido al proceso de ósmosis y llega a los vasos del tallo.

La transpiración, que se produce por los estomas de las hojas, genera la succión necesaria para que el agua ascienda. Horton denominó **capacidad de infiltración** de un suelo, a la máxima cantidad de lluvia que puede absorber en la unidad de tiempo.

Evapotranspiración (Evt). Los dos procesos mencionados previamente, rara vez se producen aislados por ello, en hidrología generalmente se los trata en forma conjunta. La Evt, sólo se produce cuando el suelo tiene cobertura vegetal, de lo contrario, sólo se producirá evaporación. La Evt depende de dos factores esenciales a) el grado de humedad del suelo b) el tipo y desarrollo vegetal; además también tienen influencia la temperatura y la humedad relativa de aire. Thornthwaite (1948) ideó el término **evapotranspiración potencial (Evtp)** para referirse al potencial máximo de evapotranspiración (suelo con contenido óptimo de humedad y apropiado desarrollo vegetal). Si alguna de las dos condiciones no se cumple, la Evt será menor y a ésta se la denomina real (**Evtr**).

La diferencia entre Evtp y Evtr es la demanda de riego o déficit de agua agrícola. En la Llanura Chacopampeana Húmeda (NE de la Prov. de Buenos Aires), la Evtr está en el orden del 75 al 85% de la lluvia.

Infiltración (I). Es el proceso por el cual el agua pasa de la superficie al subsuelo. Si el agua infiltrada supera la zona de aireación y alcanza la superficie freática se denomina **infiltración efectiva**.

Pese a que en la mayor parte de la Llanura Chacopampeana predominan suelos de granometría fina (limo y arcilla), la infiltración (10 a 15% de la lluvia), supera a la escorrentía (5 a 10% de la lluvia), debido a la escasísima pendiente topográfica (cm a m/km).

Escurrimiento superficial o escorrentía (Es). El agua de lluvia que no se infiltra ni se evapotranspira, escurre superficialmente, llegando a los cursos por cuatro vías diferentes: superficialmente, subsuperficialmente (escurrimiento hipodérmico), subterráneamente (escurrimiento subterráneo) y directamente (precipitación sobre los cursos).

Como se mencionó en el punto anterior, en las llanuras, la escorrentía es menor que la infiltración.

1.1. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN EL PLANETA

En el cuadro 1 y en la figura 2, se indica la distribución del agua en nuestro planeta, a partir de una compilación de datos publicados por Nace (1969) y Lvovitch (1967).

De ellos se desprende un neto predominio de las aguas marinas (más del 97% del total) que evidentemente constituyen la reserva más importante para los usos corrientes del futuro (agua potable, riego, uso industrial). Lamentablemente, al presente, el costo de la desalación del agua de mar es muy elevado, por lo que sólo existen pocas plantas de tratamiento en el mundo, donde no hay otra alternativa para la provisión (Kuwait - Israel) o en sitios turísticos con alto poder económico (Islas Canarias).

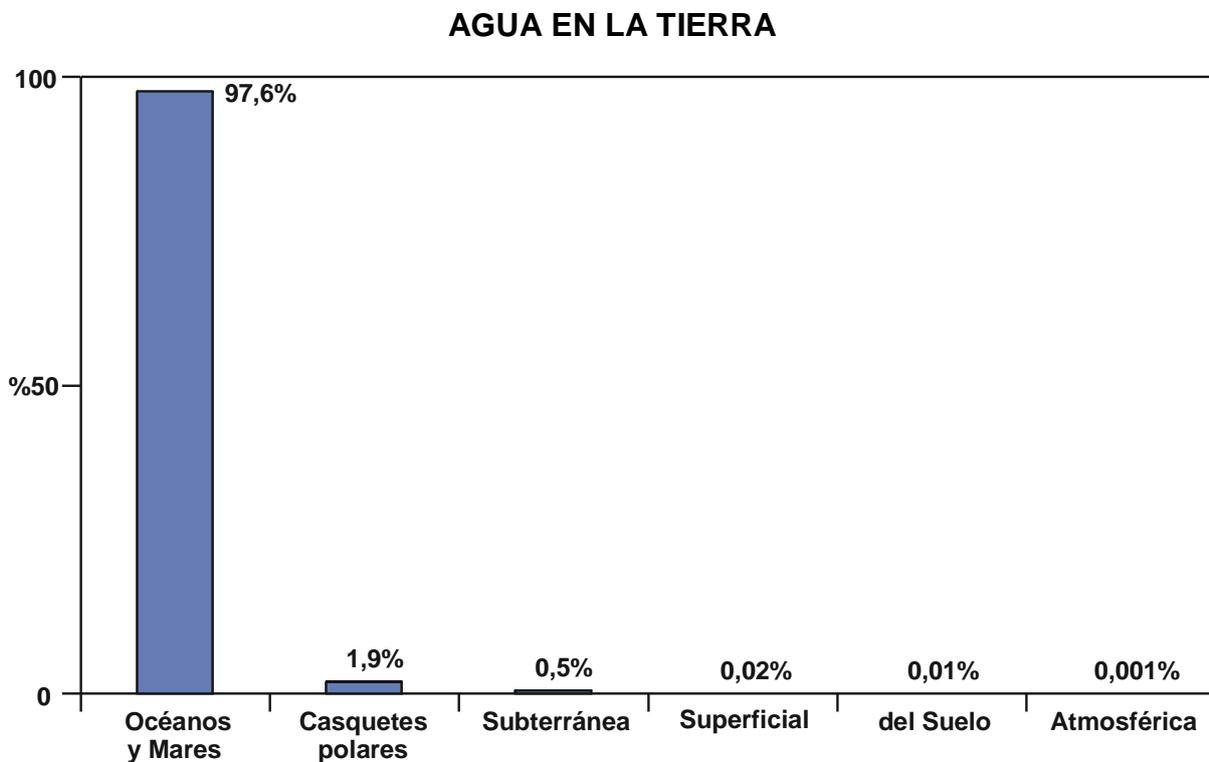
La mayor concentración de agua dulce (1,9%) se ubica en los casquetes polares en forma de hielo, lejos de los ámbitos poblados.

De las aguas continentales, el volumen almacenado hasta unos 1.000 m de profundidad (0,5%) supera con amplitud al que instantáneamente pueden contener los ríos y los lagos del mundo (0,02%).

Cuadro 1

AGUA EN LA TIERRA				
	Area km ² .10 ⁶	Volumen km ³ .10 ⁶	%	Altura equivalente (m)
Océanos y Mares	362	1.350	97,6	2.650
Casquetes polares	17	26	1,9	50
Subterránea	131	7	0,5	14
Superficial	1,5	0,3	0,02	0,6
del Suelo	131	0,2	0,01	0,4
Atmosférica	510	0,02	0,001	0,04
Total	510	1.383	100,03	2.715

Figura 2



Algunos ríos, sin embargo, tienen caudales sorprendentes, caso del Río de la Plata que con un módulo de 20.000 m³/s, sería hábil por sí solo para abastecer a la población mundial actual (6.000 millones), a razón de 290 l/día por habitante.

De cualquier manera, el agua superficial está más expuesta a la contaminación y generalmente es mucho más cara, por el tratamiento que necesita para su potabilización, que la subterránea. Por ello, en la mayoría de los países desarrollados, que se caracterizan por optimizar los usos de los recursos naturales, el empleo de agua subterránea para consumo humano, supera apreciablemente al del agua superficial (cuadro 2).

Cuadro 2

EXTRACCIÓN DE AGUA EN EUROPA		
	TOTAL km ³ /año	agua subterránea para uso humano %
Alemania	6,24	67
Bélgica	0,57	76
Dinamarca	0,70	98
Francia	5,00	50
Holanda	1,15	63
Inglaterra	2,50	32
Italia	9,95	36

También resulta interesante indicar el consumo total de agua en el mundo y su evolución histórica, así como la distribución en relación al uso (cuadro 3).

Cuadro 3

USO DEL AGUA EN EL MUNDO							
	Consumo total	Agricultura		Industria		Agua potable	
año	km ³ /año	km ³ /a	(%)	km ³ /a	(%)	km ³ /a	(%)
1900	400	350	87,5	30	7,5	20	5
1950	1100	820	74,5	220	20	60	5,5
1975	3000	2200	73	650	22	150	5
2000	5000	3400	68	1250	25	350	7

Del cuadro 3 se desprende el neto predominio de la agricultura como consumidor de agua, alrededor del 70% del total extraído desde 1900, frente al **consumo humano** que sólo incidió en el 6%.

1.2. EL AGUA EN ARGENTINA

Alrededor del 75% del territorio argentino es árido o semiárido; o sea presenta déficit en el balance hídrico. A esto, se agrega el hecho de que sólo dos regiones tienen abundante agua superficial potabilizable (Mesopotamia y Cordillera Patagónica). Por ello el agua subterránea juega un rol importantísimo en la provisión para consumo humano y para riego. A nivel del país, aproximadamente un 50% del

abastecimiento para consumo humano es de origen subterráneo. En el cuadro 4 se indican los consumos locales del Conurbano de Buenos Aires y de La Plata, durante 1990.

Cuadro 4

CONSUMO DE AGUA EN EL CONURBANO DE BUENOS AIRES – 1990			
Población 8,9 millones			
	hab.	agua sup. hm ³	agua subt. hm ³
Población servida	3,5.10 ⁶	383	256
Población no serv.	5,4.10 ⁶		100
Industria		100	300
Riego			120
Total:		483 (38%)	776 (62%)
LA PLATA			
Población 700.000			
	hab.	agua sup. hm ³	agua subt. hm ³
Población servida	0,5.10 ⁶	55	50
Población no serv.	0,2.10 ⁶		4
Industria		30	2
Riego			110
Total:		85 (34%)	166 (66%)

Del cuadro se desprende que en el Conurbano, el mayor volumen de agua se destinó en 1990 al consumo humano (739 hm³) sobre un total de 1259 hm³; o sea el 59%, seguido por la industria (400 hm³, el 32%) y finalmente el riego (120 hm³, el 9%). De la demanda total, un 62% se cubrió con agua subterránea y un 38% con agua superficial.

Algo parecido sucede en relación al empleo de agua subterránea en La Plata, aunque aquí el índice respecto al total es algo mayor (66%). Sin embargo, en La Plata el volumen para riego (110 hm³) fue prácticamente igual que el utilizado para consumo humano (109 hm³) y ampliamente superior al empleado para la industria (32 hm³).

1.3. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN EL SUBSUELO

Por debajo del suelo se distinguen dos zonas con comportamientos hidráulicos diferentes (subsaturada y saturada).

La **zona subsaturada**, es la que se ubica inmediatamente por encima de la superficie freática y en ella coexisten los 3 estados de la materia (sólido, líquido y vapor). Posee gran trascendencia hidrogeológica, no sólo en el aspecto dinámico sino también geoquímico, pues en ella, particularmente en su franja más superficial (faja edáfica), es donde se produce la mayor incorporación de las sales solubles que caracterizan al agua subterránea de ciclo. Además, la zona subsaturada o de aireación, o no saturada, es un efectivo filtro natural frente a los contaminantes, en su recorrido descendente hacia la zona saturada, o del agua subterránea propiamente dicha.

La **zona saturada**, se desarrolla por debajo de la superficie freática y en ella coexisten sólo líquido (agua) y sólido (granos). También se la conoce como zona del agua subterránea propiamente dicha, pues de ella es de donde captan los pozos.

En la figura 3 se representa la distribución del agua en el subsuelo y en la 4 el detalle de cada zona.

Figura 3

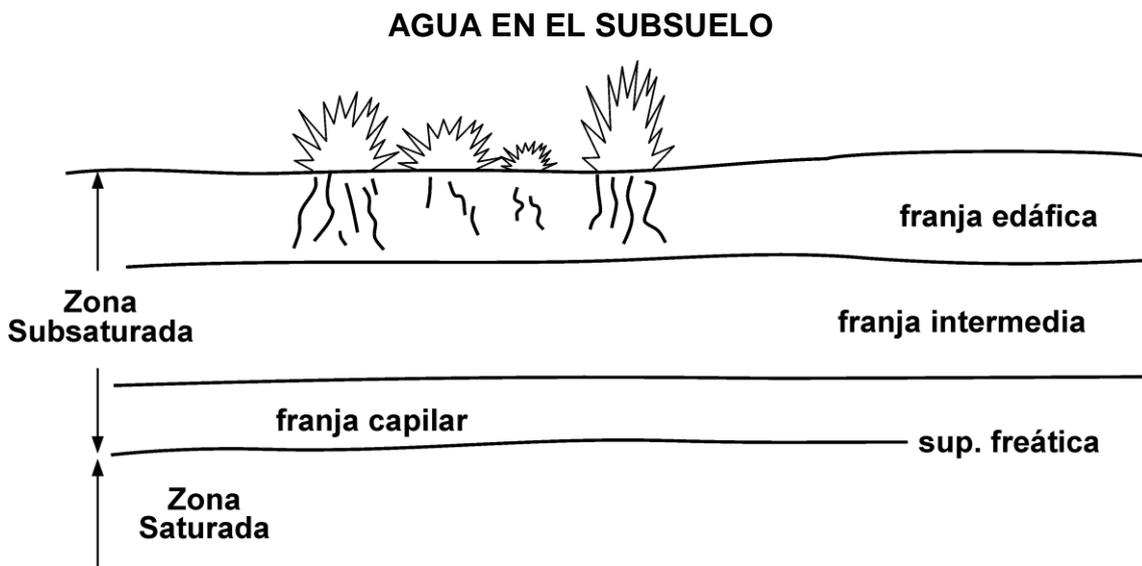
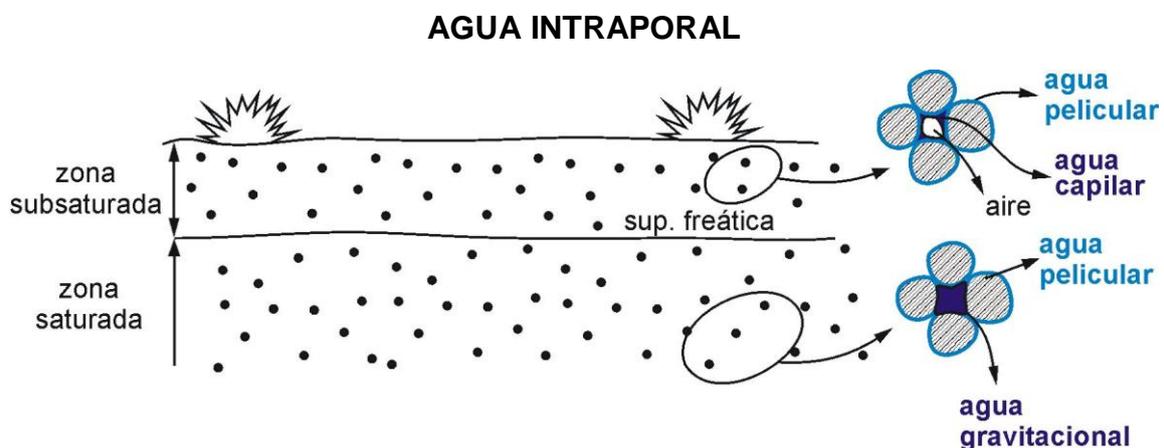


Figura 4



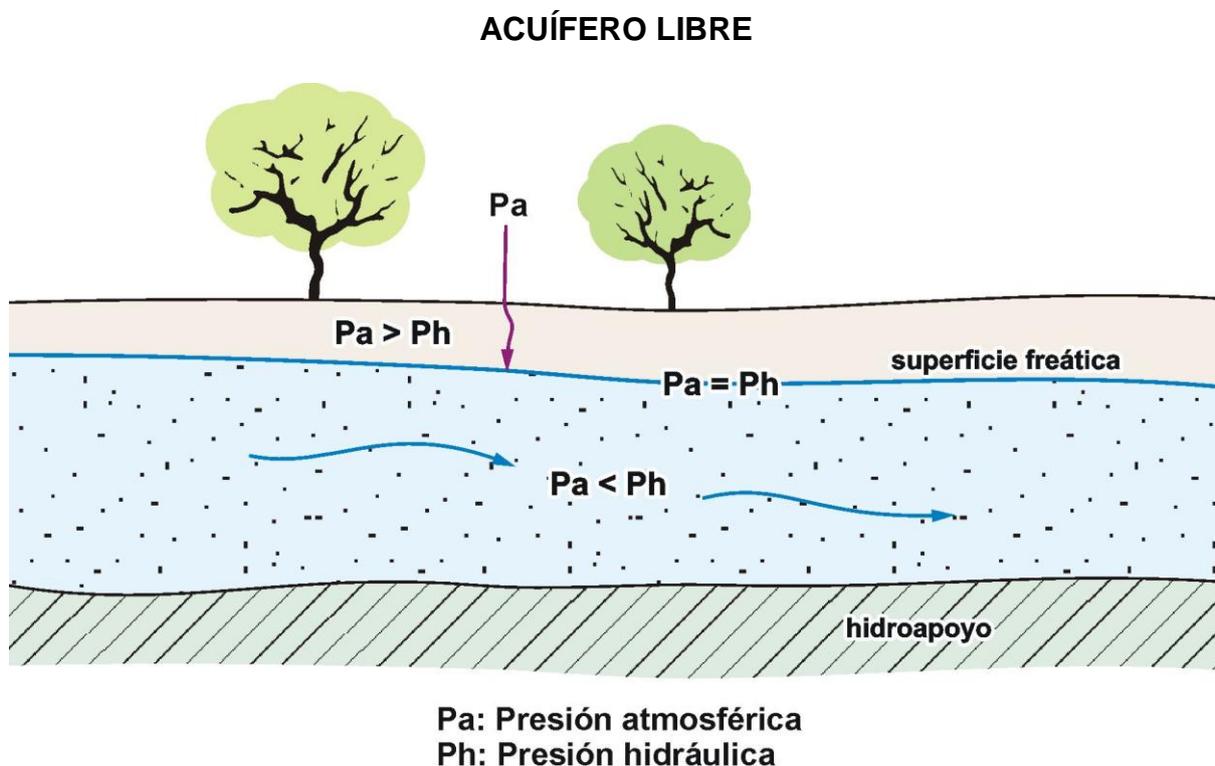
1.4. TIPOS DE ACUÍFEROS

De acuerdo a la presión hidrostática se clasifican en: **libre, freático o no confinado; cautivo artesiano o confinado; semiconfinado o filtrante.**

Acuífero libre

Es el que posee una superficie hidráulica o freática, que actúa como techo del mismo, está en contacto directo con la atmósfera y por lo tanto a la misma presión (figura 5). Los acuíferos libres son los más expuestos a la contaminación y por ende, los más vulnerables. Su coeficiente de almacenamiento es igual a la porosidad efectiva, con extremos entre 0,05 y 0,30. Ejemplo de este tipo de acuíferos es la sección superior del Pampeano.

Figura 5



Acuífero confinado

Se caracteriza pues su techo y su piso están constituidos por capas de bajas permeabilidad o “confinantes”. Por ello y por la posición de la zona de recarga, la presión hidrostática a nivel del techo del acuífero es mayor que la atmosférica. Esto hace que en los pozos que interesan a acuíferos confinados, el agua ascienda rápidamente por su interior. Si el agua alcanza la superficie topográfica al acuífero y al pozo se los llama “surgentes”; si el agua supera el techo del acuífero, pero sin manar en superficie, se lo llama “artesianos”.

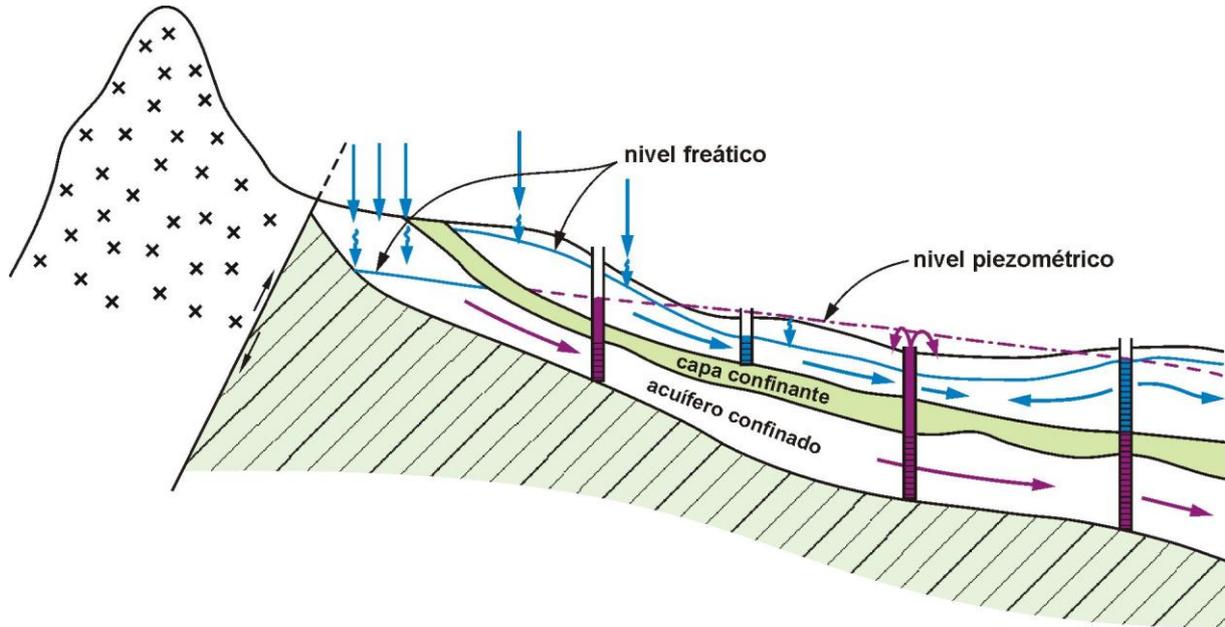
La superficie virtual correspondiente al nivel hidráulico de los acuíferos confinados se llama “superficie piezométrica”. El coeficiente de almacenamiento de estos acuíferos varía entre 10^{-4} y 10^{-5} . Los acuíferos confinados se recargan

solamente en los sitios donde afloran y son los que poseen mayor protección natural frente a la contaminación.

En la figura 6 se representan las relaciones hidráulicas entre un acuífero confinado y el libre sobreyacente en un ámbito de piedemonte y llanura adedaña.

Figura 6

ACUÍFEROS LIBRE Y CONFINADO



Como ejemplo de acuífero confinado en la Provincia de Buenos Aires, se puede señalar al contenido en la Formación Paraná, cuyo techo está constituido por arcillas plásticas de origen marino, de tonalidad verde-azulada, y su piso por arcillas rojizas de la Formación Olivos.

Acuífero semiconfinado

Estos acuíferos son mucho más frecuentes en la naturaleza que los confinados. En los semiconfinados, el techo, el piso, o ambos, están formados por capas de baja permeabilidad, que si bien dificultan, no impiden la circulación vertical de agua. Para que ello suceda, además de la permeabilidad, deben existir diferencias de carga o potencial hidráulico entre el acuífero semiconfinado y el que se le sobre o infrapone. Los acuíferos semiconfinados se recargan y descargan a través de unidades de baja permeabilidad llamadas **semiconfinantes, filtrantes, o acuitardos**. Su coeficiente de almacenamiento varía entre 10^{-3} y 10^{-4} .

2. ACUÍFEROS PAMPEANO Y PUELICHE

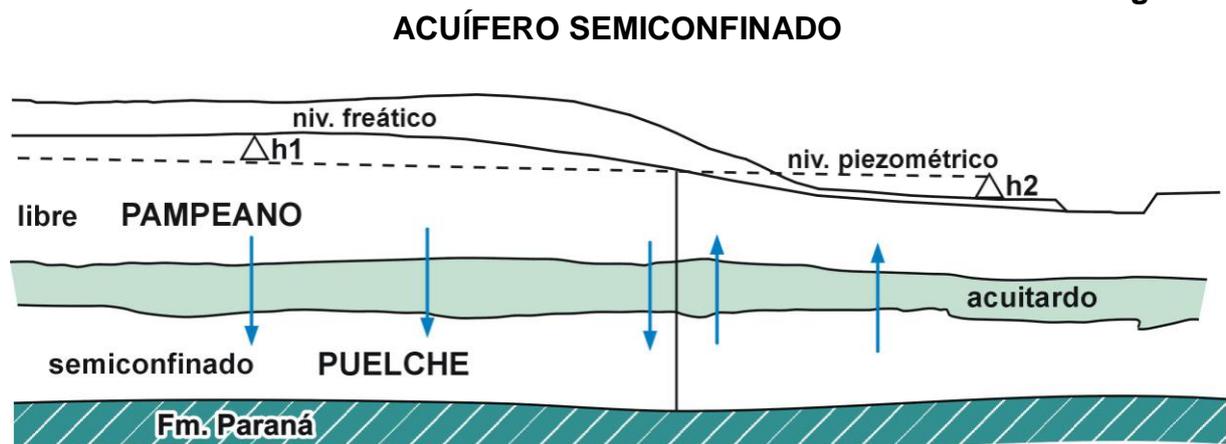
Los acuíferos Puelche y Pampeano, son los más empleados en la Provincia de Buenos Aires, y en las de Córdoba y Santa Fe. El primero también es ampliamente utilizado para regar arroz en Entre Ríos y Corrientes, donde se lo denomina Acuífero Ituzaingó.

El Puelche suele aprovecharse para el abasto de agua potable en la mayoría de las ciudades y localidades ubicadas en el NE de la Provincia de Buenos Aires, que no se encuentran a la vera de los ríos Paraná y de la Plata; también se lo capta para la industria y para riego intensivo y extensivo. El Pampeano, de menor productividad y más expuesto a la contaminación, en general se capta en zonas urbanizadas de menores recursos económicos y con escasos servicios y en el ámbito rural, para el abastecimiento doméstico y del ganado.

2. 1. RECARGA Y DESCARGA

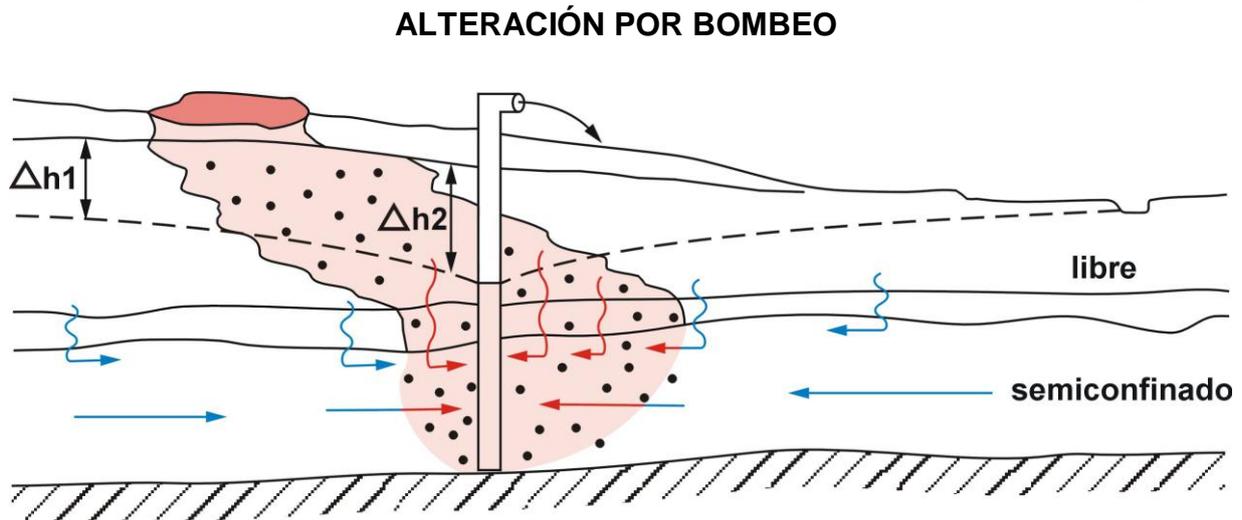
El Puelche, actúa como semiconfinado por su techo, recargándose a partir del Pampeano sobrepuesto y descargándose naturalmente en el mismo, como se aprecia en la figura 7.

Figura 7



En la figura 8 la extracción del Puelche generó una nueva relación hidráulica entre los dos acuíferos, cuya consecuencia más trascendente respecto a la vulnerabilidad del semiconfinado, es el descenso de su superficie piezométrica con la consecuente sobrecarga hidráulica del libre en el techo del acuitado, lo que facilita la filtración vertical descendente y el acceso de contaminantes al semiconfinado.

Figura 8



Esta extracción fue la responsable de la contaminación del Puelche desde el Pampeano, fundamentalmente con NO_3 , dado que hasta 1990, aproximadamente, el nivel piezométrico del primero estaba muy deprimido respecto al Pampeano. A partir de ese momento, la salida de servicio de un gran número de pozos que abastecían de agua potable al Conurbano y su reemplazo por agua del Río de la Plata, hizo que se fueran recuperando los niveles de ambos acuíferos, hecho favorecido en gran medida por la falta de desagües cloacales en gran parte del Conurbano. Hoy la situación es de alto riesgo en muchos partidos del Conurbano, debido al afloramiento de agua freática fuertemente contaminada.

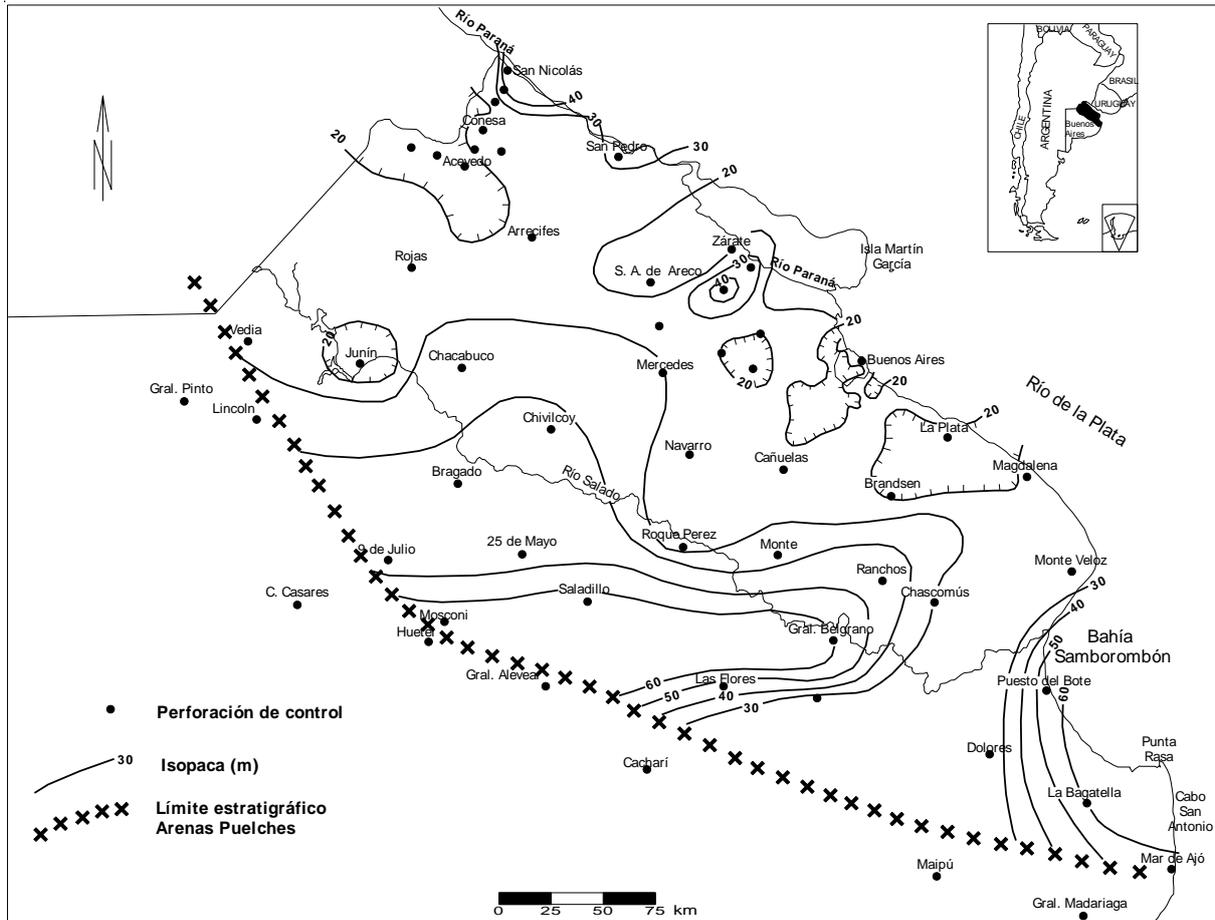
2.2. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS

En la figura 9 se indica la distribución geográfica y las variaciones de espesor de las Arenas Puelches que constituyen la formación geológica que contiene al acuífero homónimo, en la Provincia de Buenos Aires.

En el mapa se aprecian espesores dominantes entre 20 y 30 m, en la ribera del Río de la Plata (Buenos Aires, La Plata, Magdalena, Monte Veloz) y entre 30 y 40 m en el vértice Noroeste del ámbito estudiado (sector de San Nicolás). Las mayores potencias se registran al S del Río Salado, con más de 60 m (Gral. Belgrano, Saladillo y Mosconi) y hacia la Bahía Samborombón (Puesto del Bote, La Bagatella, Mar de Ajó). El incremento de espesor condiciona el aumento en la transmisividad del acuífero hacia el SO, con valores extremos de 200 y 2.700 m^2/d en la ribera del Río de la Plata y en la cuenca del Río Salado respectivamente, para una permeabilidad media de 30 m/d (Auge et al, 1973).

El límite SO de las Arenas Puelches se dispone en forma subparalela al Río Salado, ubicándose a unos 30 km del mismo en el extremo NO (Vedia) y a 80 km en su desembocadura (Puesto del Bote). Dicho límite, que trunca a las isopacas, constituye el reemplazo hacia el SO de las Arenas Puelches por las Arcillas Pardas o Formación Araucano, constituida por areniscas arcillosas pardas, con abundante yeso y agua inapta por el alto tenor salino y en sulfatos.

EXTENSIÓN Y ESPESOR DEL ACUÍFERO PUELCHES



No se tiene certeza sobre si el contacto lateral de las Arenas Puelches con las Arcillas Pardas es estratigráfico o tectónico, aunque parece más probable que represente la margen SO del protodelta que dio origen a la Formación Arenas Puelches.

La secuencia sedimentaria es gradada, con frecuente gravilla en el sector inferior y arena muy fina a limosa, en el pasaje a las arcillas que le sirven de techo (acuitardo). No obstante, existen algunos perfiles donde la secuencia está invertida, aunque cuantitativamente son menos casos. Sobre el valle del Río Paraná, las arenas suelen pasar sin solución de continuidad a la sección samítica de la Fm Paraná, con ausencia de las arcillas verdes de la sección superior, debido a la continua acción fluvial del antiguo Paraná.

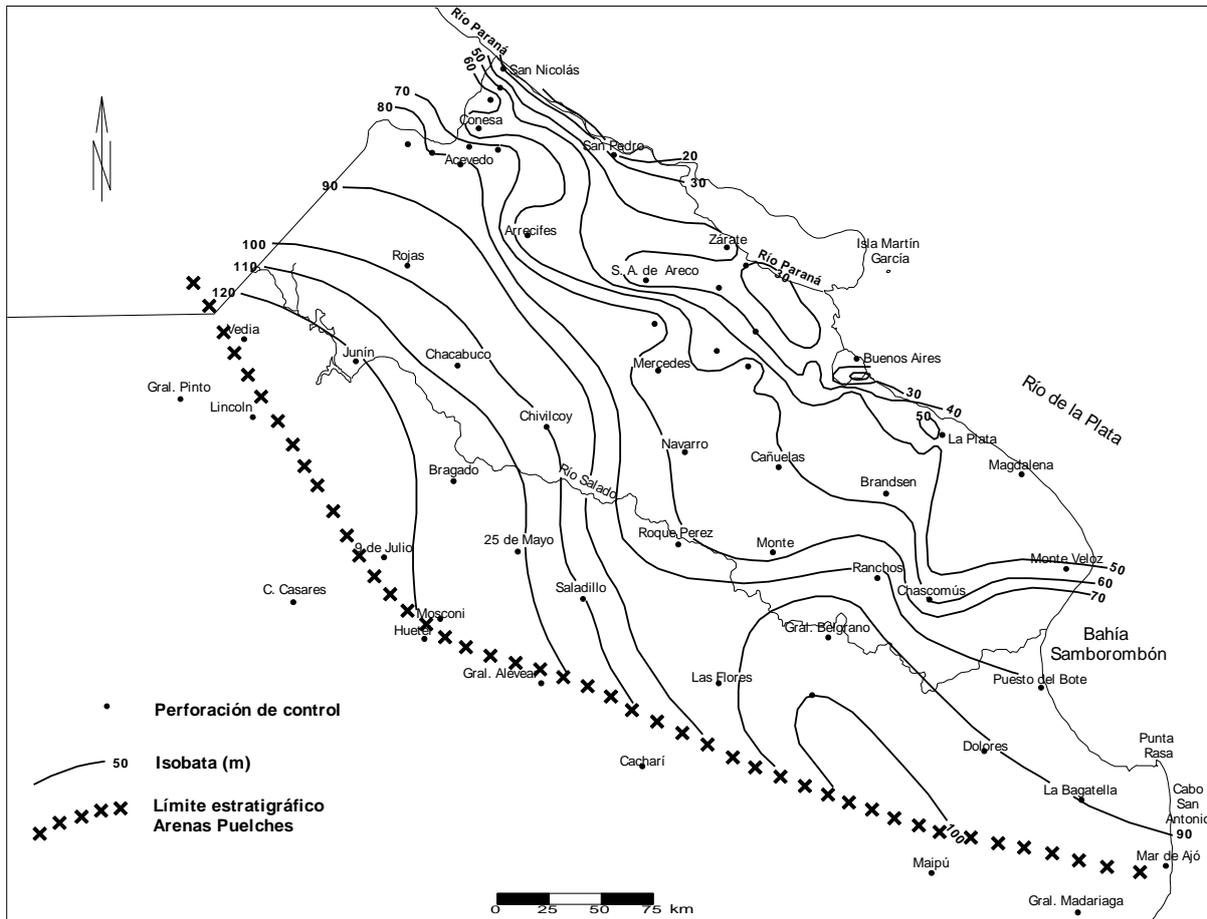
Sobre la base del mapa isopáquico se ha calculado el volumen de las Arenas Puelches en la provincia de Buenos Aires, que alcanza a unos $3,1 \cdot 10^6$ hm³. Dado que la superficie involucrada es de $9,2 \cdot 10^6$ hm², la potencia media es de 34 m. Utilizando un valor de porosidad efectiva media del 20%, obtenida a partir de la estimación de velocidades efectivas de flujo, el volumen de agua gravitacional almacenada ascendería a unos 620.000 hm³ del cual aproximadamente el 45%

está compuesto por aguas con una salinidad total inferior a 2 g/l, resultando apta para consumo humano según dicho indicador (Auge y Hernández, 1984).

En la figura 10 se representa la variación espacial de la profundidad del techo de las Arenas Puelches.

Figura 10

PROFUNDIDAD TECHO ACUÍFERO PUELCHES

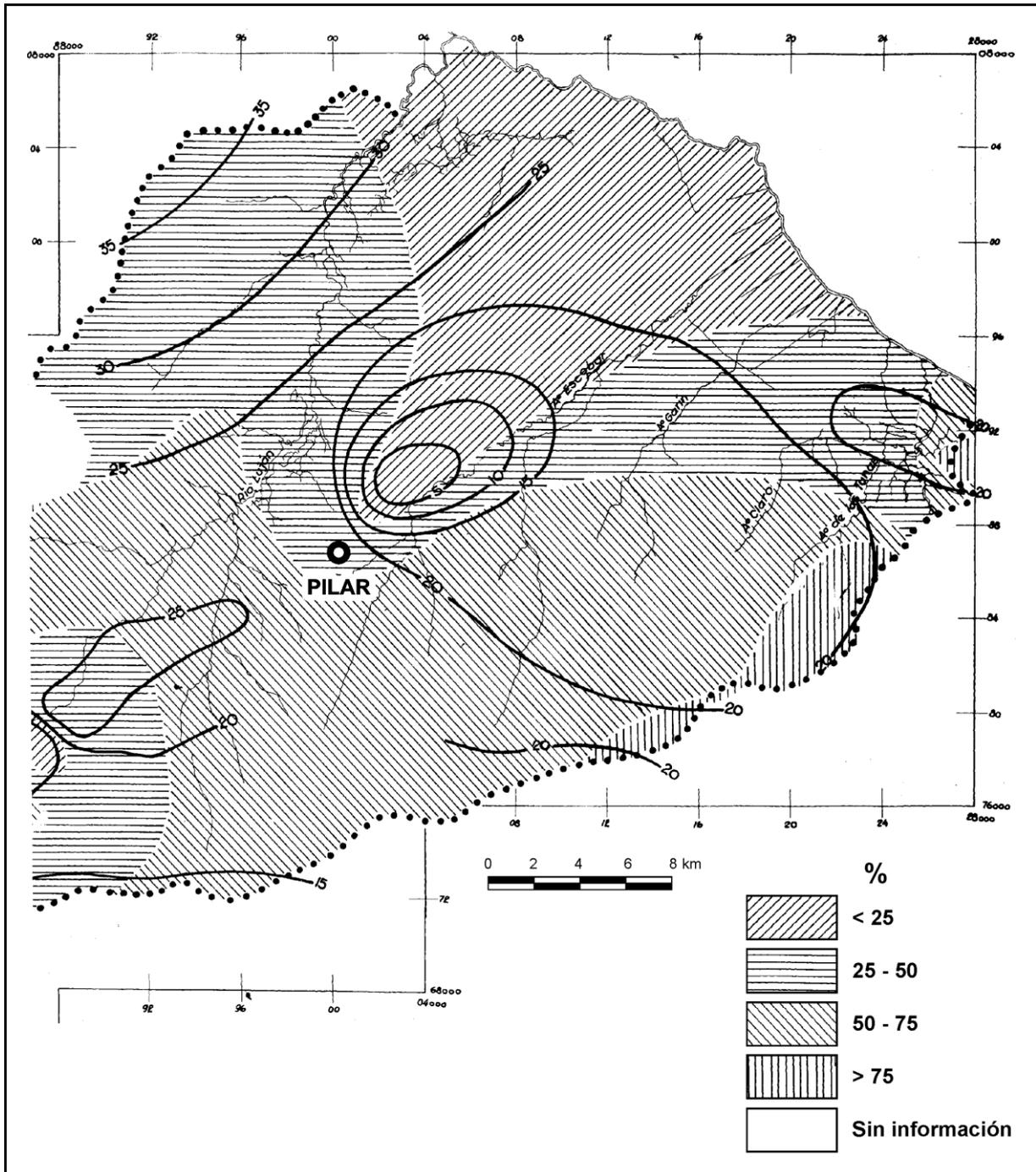


Se puede observar que desde valores de 20 a 30 m en el sector NE (ribera de los ríos Paraná y de la Plata), se produce una progresiva profundización hacia el SO, que culmina en proximidades de Junín con 123 m. En este comportamiento inciden, además de las variaciones topográficas, el buzamiento del techo de la Fm Arenas Puelches en sentido SO, que alcanza un valor medio de 0,4 m/km pasando desde -20 m en la proximidad de los ríos precitados a -80 m en Las Flores.

Localmente, el Acuífero Puelche presenta espesores del orden de 20 m en Pilar, con incrementos de hasta 25 m hacia el SO (Luján), dirección en la que también se aprecia un aumento en el porcentaje de arena (50 al 75%). Contrariamente, hacia el NE (Villa Rosa), se produce una disminución en el espesor (5 m) y en el porcentaje de arena, que desciende a menos del 25% (figura 11).

Figura 11

ESPESOR Y PORCENTAJE DE ARENA ACUÍFERO PUELCHE



Respecto a la profundidad, el techo del Puelche se emplaza alrededor de 40 m en Pilar, valor que crece a 50 m hacia el Sur (Gral. Rodríguez), debido a la mayor altura del terreno y a la profundización del acuífero y, que disminuye a unos 25 m hacia el Norte, en la vecindad del Río Luján, por menor cota topográfica y ascenso del techo.

3. SISTEMAS DE PERFORACIÓN

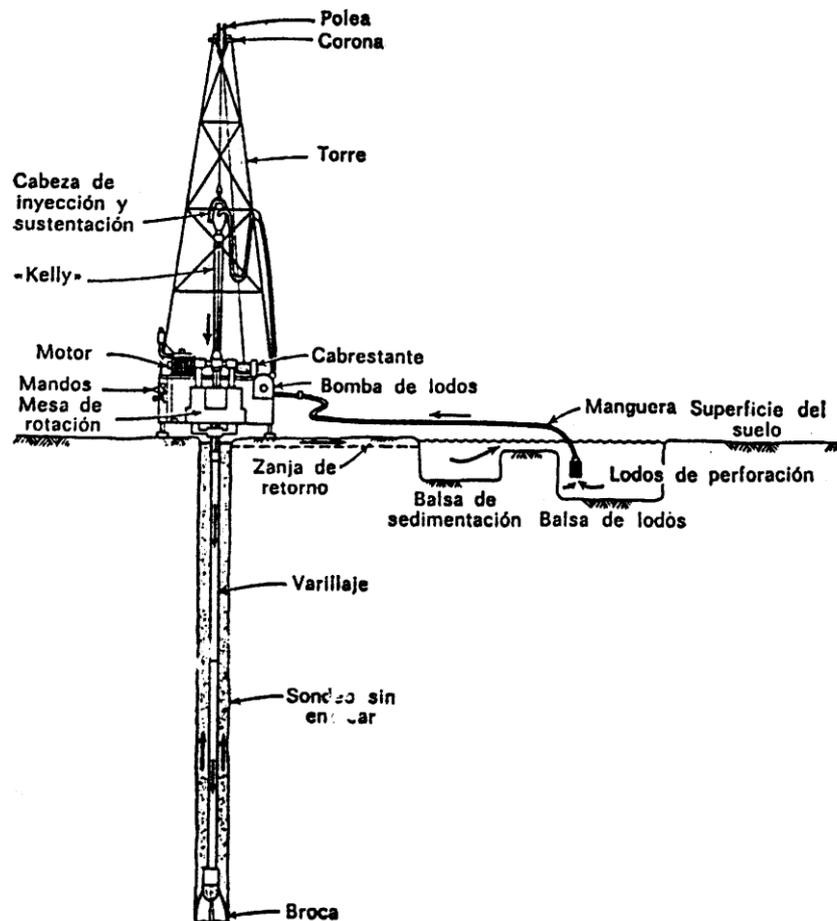
Si bien existen numerosos sistemas de perforación, los más empleados en la ejecución de pozos para la exploración y/o captación de agua subterránea son:

- Rotación, con circulación directa e inversa
- Percusión
- RotoperCUSión

3.1. ROTACIÓN CON CIRCULACIÓN DIRECTA

Este sistema de perforación, basado en la rotación del trépano y la inyección del fluido a través de las barras, es el más difundido y empleado, tanto en perforaciones para agua, como en las petrolíferas. Su mayor ventaja radica en la velocidad de avance. Al respecto, en terrenos relativamente blandos, como los del NE de la Provincia de Buenos Aires, una perforación de pequeño diámetro (6") puede avanzar hasta 80 - 100 m por día; mientras que con un equipo petrolífero y en diámetro, de hasta 20", se alcanzan sin mayor problema los 300 m/día.

Figura 12



Equipo de perforación rotativa con circulación directa.
Componentes y flujo de la inyección.

Uno de los mayores inconvenientes que presenta la rotación con circulación directa, es la falta de representatividad de las muestras litológicas que se colectan en boca de pozo (cutting) y que son llevadas en forma ascendente por la inyección. A esta falencia se agregan la falta de representatividad en la identificación de capas acuíferas, dado que el pozo está lleno de agua durante la perforación y, la invasión y daño que puede producir la inyección en horizontes productivos.

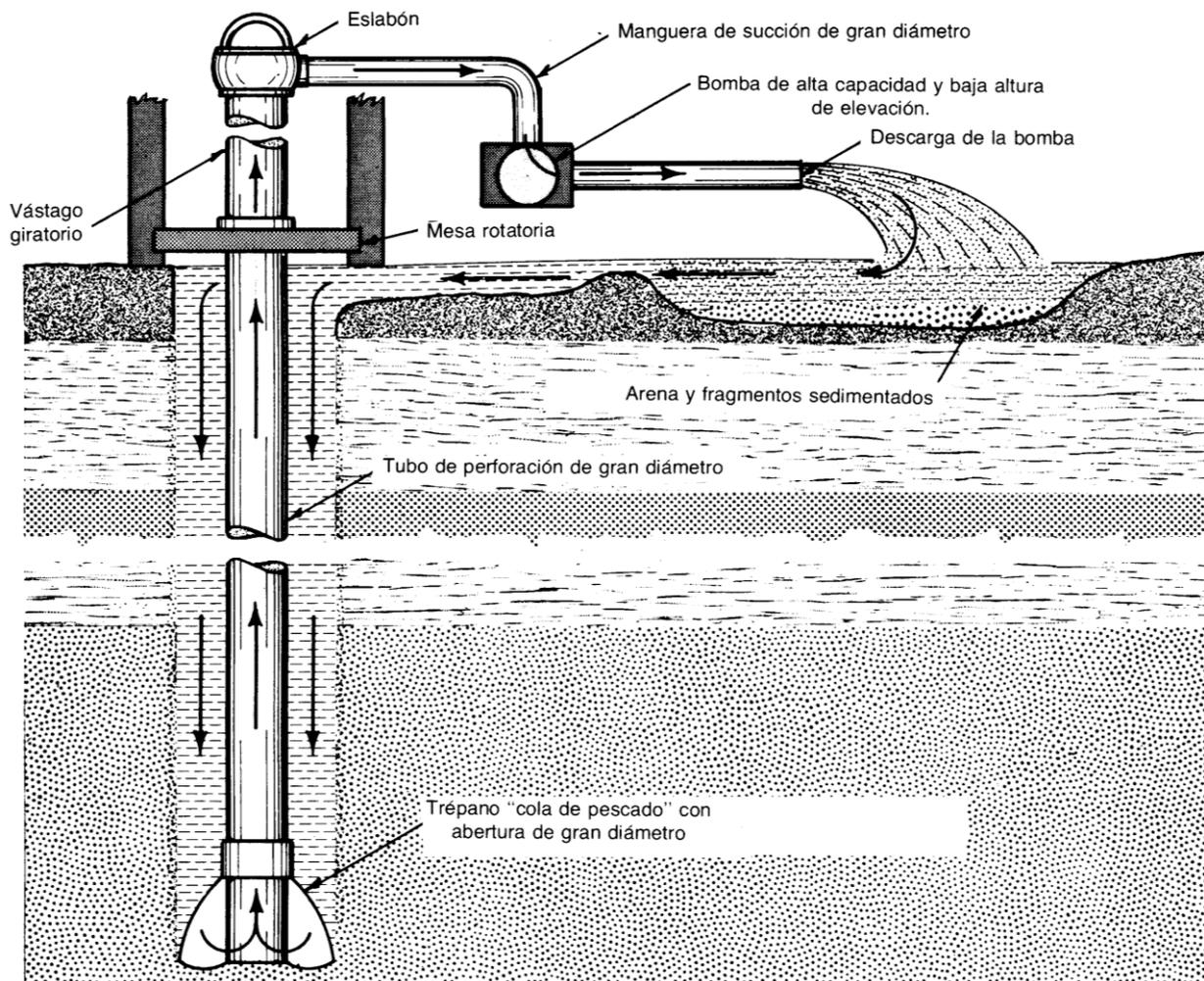
En la figura 12 se esquematizan los componentes principales y el sentido del flujo en una perforación rotativa con circulación directa.

3.2. ROTACIÓN CON CIRCULACIÓN INVERSA

Este sistema está mucho menos empleado que el anterior, pese a que para profundidades someras (menos de 100 m) posee ventajas apreciables respecto a la circulación directa.

En la rotación con circulación inversa, el sentido del flujo de la inyección es contrario al de la circulación directa. En el primero, el cutting asciende por aspiración y retorna al pozo por gravedad, a través del espacio anular (figura 13).

Figura 13



Equipo de perforación rotativa con circulación inversa. Componentes y flujo de la inyección.

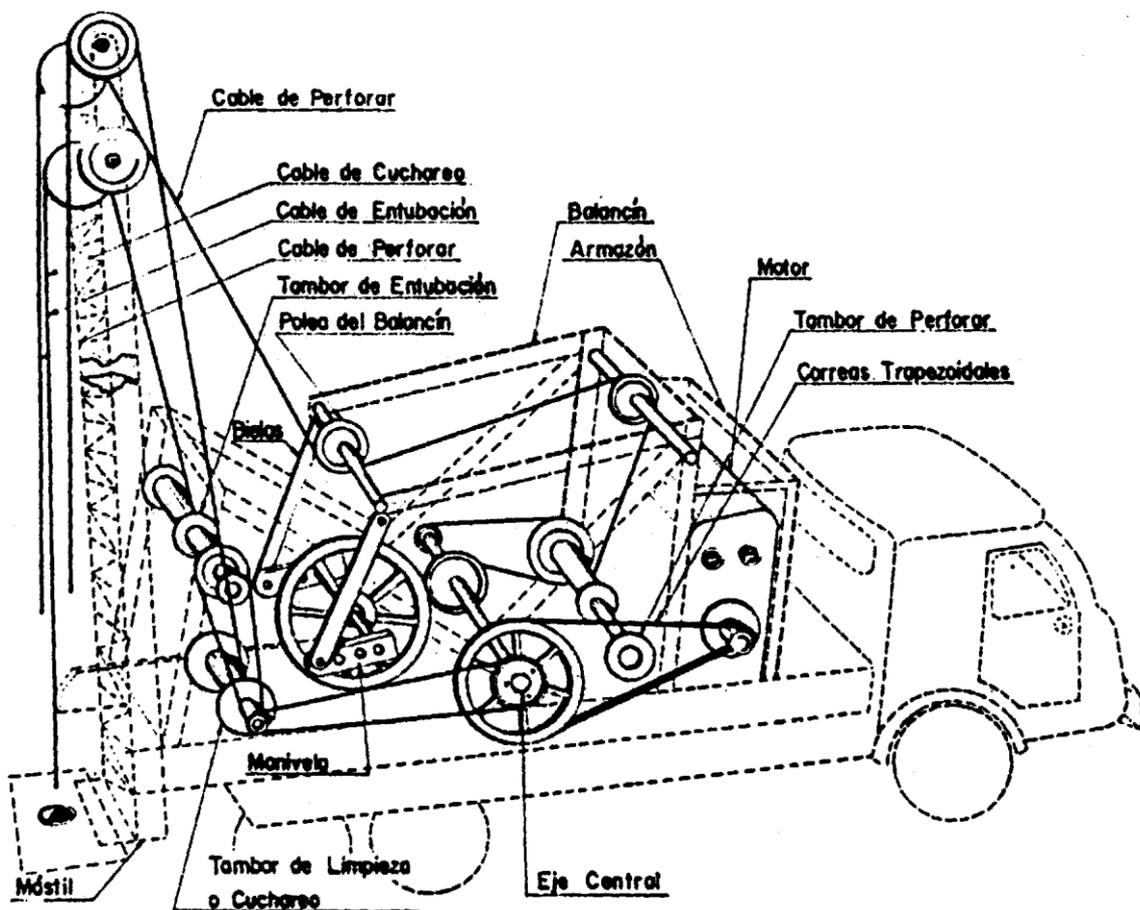
La circulación inversa requiere de barras de mayor diámetro, 3" como mínimo, y de un volumen de agua significativamente mayor en el circuito de inyección (al menos 40 m³/h) para permitir la extracción del material perforado (cutting). Las ventajas más significativas respecto a la circulación directa son:

- El muestreo litológico es mucho más representativo.
- Normalmente no requiere el agregado de aditivos a la inyección (bentonita, polímeros orgánicos).
- Permite la construcción de pozos de diámetros mayores (20 a 30")

3.3. PERCUSIÓN A CABLE

Prácticamente no se utiliza en ambientes con cobertura de sedimentos, como la mayor parte de la Provincia de Buenos Aires, debido a la lentitud en el avance y a la necesidad de emplear varios diámetros de cañería (entubamiento telescópico), cuando se superan 80 o 100 m de profundidad. En regiones como Pilar, rara vez se superan 10 m de avance diario. Otra desventaja de la percusión a cable, es lo dificultoso que resulta la extracción de cañerías temporarias de encamisado, maniobra que requiere en muchos casos el empleo de criques de alta capacidad de tiraje.

Figura 14



Componentes de un equipo de perforación por percusión a cable.

En la figura 14 se esquematizan los componentes esenciales de un equipo de perforación a cable y en la figura 15 los elementos que, sostenidos por el cable, constituyen la herramienta de perforación.

Las mayores ventajas de este sistema respecto al de rotación con circulación directa son:

- Permite un muestreo más representativo de la litología y de los acuíferos.
- Evita el daño por invasión en las capas productivas porque no utiliza aditivos para la inyección.

Se lo emplea en ambientes geológicos formados por rocas resistentes y/o rodados cementados o sueltos, pero últimamente fue cediendo ante el sistema de rotopercusión que permite un avance mucho más rápido.

3.4. ROTOPERCUSIÓN

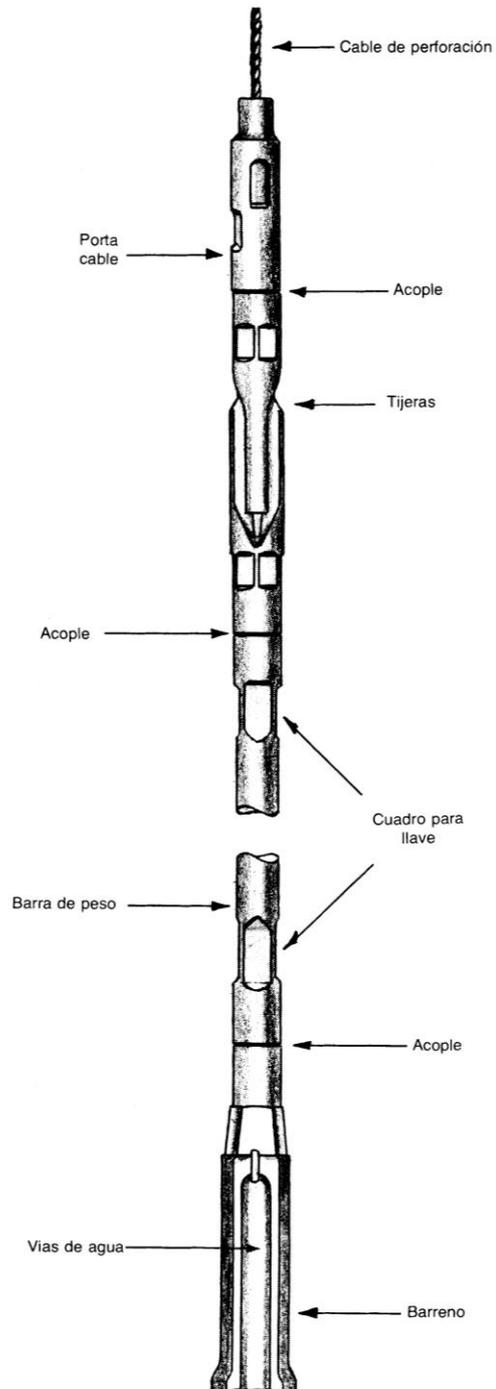
Este sistema combina los principios de la rotación y la percusión. El más utilizado es el que emplea aire como fluido de inyección, para lo que requiere de un potente compresor, que también acciona un martillo de fondo.

El aire se inyecta por dentro de las barras y después de salir por los orificios del trépano, asciende por el espacio anular, siguiendo el mismo trayecto que la inyección por rotación con circulación directa y arrastrando a la superficie el material triturado por el trépano.

La mayor ventaja de este sistema es la rapidez con que avanza en roca y en terrenos formados por rodados de gran tamaño. Las desventajas son:

- Requiere grandes y costosos compresores.
- El muestreo litológico es muy poco representativo.
- Su alcance está limitado por la columna de agua dentro del pozo.

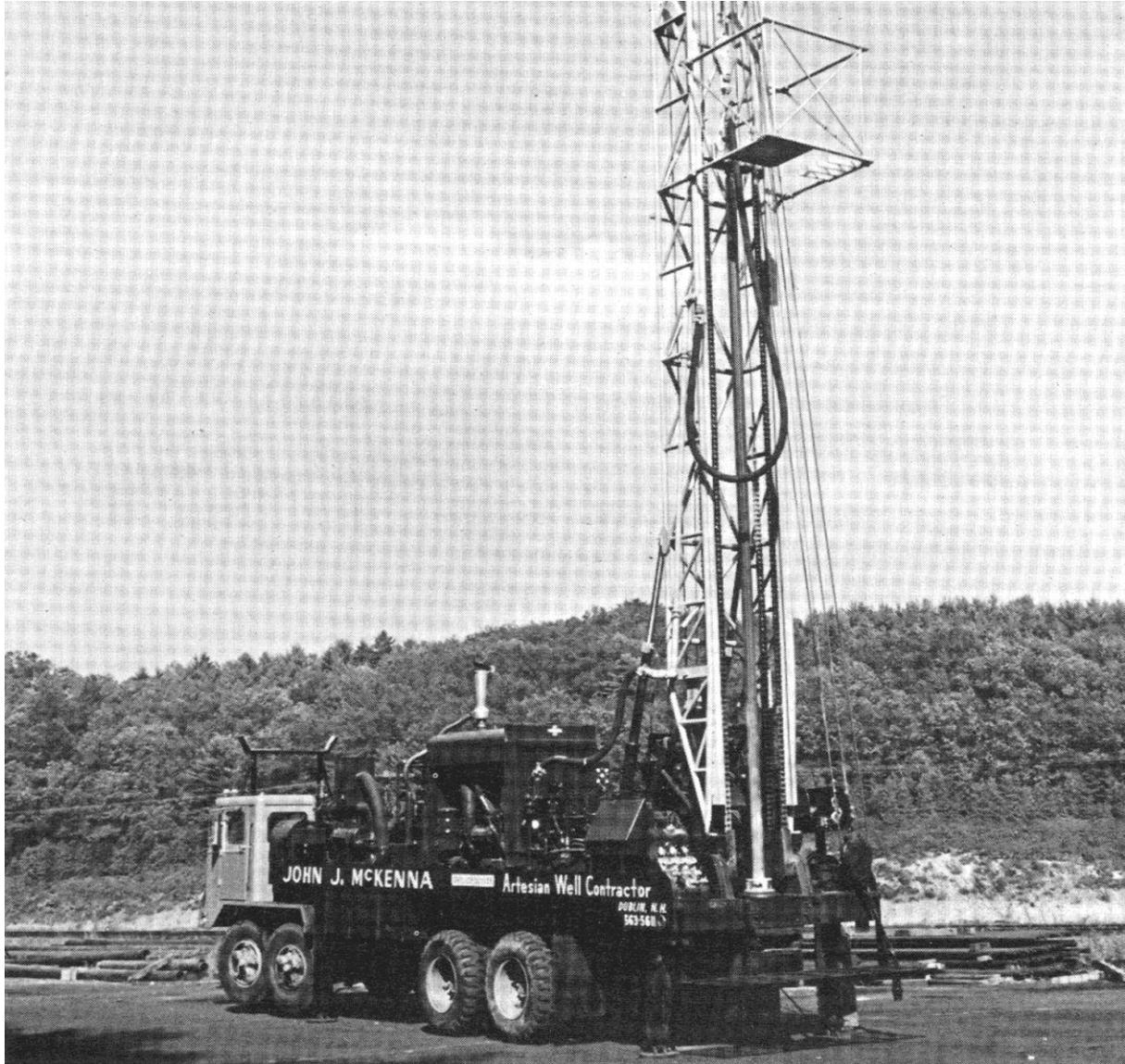
Figura 15



Herramienta para perforar con percusión a cable.

La figura 16 es una fotografía de un equipo a rotopercusión, que también posee una bomba para la inyección de líquido, en caso de ser necesario.

Figura 16



Equipo de perforación por rotopercusión. En la imagen se aprecia el compresor para operar el martillo neumático y extraer el material triturado por el trépano. También posee una bomba de inyección de lodo.

La figura 17 muestra un modelo de trépano acoplado al martillo de fondo; para facilitar el corte y la trituración, los dientes están engarzados con pastillas de carburo de tungsteno (widia).

3.5. POZO PILOTO

El pozo piloto o de exploración es una perforación de diámetro pequeño (4 a 6"), que se ejecuta para conocer las características litológicas del subsuelo y las propiedades hidráulicas y químicas de los acuíferos, a fin de diseñar, en el caso de un resultado exitoso, la perforación definitiva o de captación.

Los pozos de exploración resultan necesarios cuando la perforación definitiva se ejecutará por rotación con circulación directa y durante su realización, deberán tomarse los recaudos para lograr un muestreo lo más representativo posible de los terrenos atravesados, particularmente cuando se superan los 80 o 100 m de profundidad. Esto, pues el cutting requiere del tiempo necesario para llegar desde el fondo del pozo a la superficie, arrastrado por el fluido de

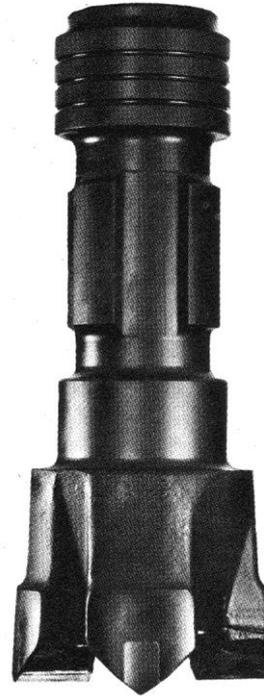
inyección. La velocidad ascendente de la inyección depende del caudal impulsado por la bomba, del diámetro del pozo y de posibles fugas al enfrentarse con capas permeables. Además, la velocidad de ascenso de la inyección puede ser muy distinta a la del material que arrastra (cutting), especialmente cuando esta es poco viscosa y el cutting de tamaño considerable. Cuando el tamaño y la densidad del cutting hacen inviable su salida por la boca del pozo, este queda flotando en el interior del mismo y se sedimenta o acumula por encima del trépano, al efectuar el agregado de la barra de perforación, inmovilizando la herramienta. A modo de ejemplo: si se está perforando con barras de 2" y trépano de 6", con una bomba que inyecta 8 m³/h, el tiempo que tarda el fluido en ascender desde una profundidad de 100 m hasta la superficie, es de unos 13 minutos, a una velocidad de 8 m/min. Esto implica que para tomar una muestra proveniente de esa profundidad, debe mantenerse circulando, sin avanzar, durante unos 15 minutos. El cálculo anterior se basa en la ecuación elemental de la dinámica de fluidos:

$$Q = v \cdot A$$

Q: caudal v: velocidad A: área de pasaje

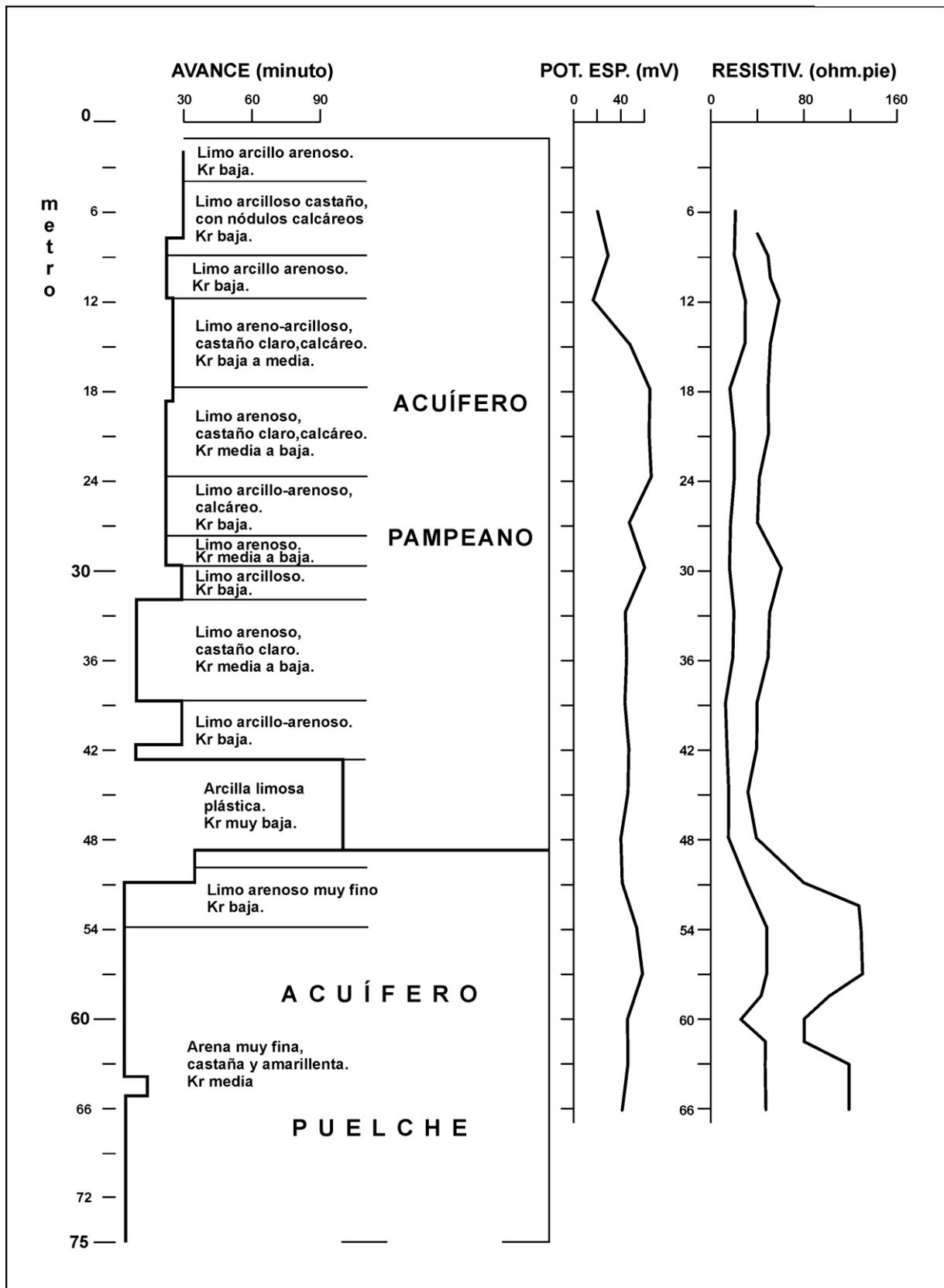
Otra práctica que brinda un buen indicio del comportamiento de las unidades geológicas atravesada por el trépano, es la medición de la velocidad de avance del mismo. Para ello se marca el vástago cada 1 m y se mide el tiempo que tarda en recorrerlo. Pese a que en la velocidad de avance inciden, además de la litología, la velocidad de rotación, el tipo y estado del trépano, el caudal de

Figura 17



Trépano para rotopercusión con martillo neumático de fondo y pastillas de widia.

Figura 18



Perfil litológico, de avance y eléctrico, en un pozo piloto perforado en Gándara.

inyección y el peso ejercido por la herramienta en el fondo del pozo, generalmente se obtienen buenos resultados, aunque no puedan precisarse algunos de estos factores (presión de la herramienta en el fondo). En materiales arcillosos la velocidad de avance es notoriamente menor que en arenas sueltas y limpias. La presencia de tosca (carbonato de calcio) en el loess, también dificulta el avance y en este caso se manifiesta por un zapateo, a veces intenso, en la mesa rotativa. Las arenas arcillosas y los limos arenosos (loess) brindan velocidades de perforación intermedias entre las arenas y las arcillas. En la figura 18 se reproduce el perfil de avance de una perforación exploratoria en Gándara, que alcanzó 75 m.

El avance está expresado por la relación profundidad – tiempo y en el perfil, puede apreciarse claramente el ingreso al limo arenoso, castaño claro, que se desarrolla de 32 a 39 m, por una disminución notoria en el tiempo, lo que implica un aumento en la velocidad. También, el pasaje a la arcilla limosa, plástica, de 42 a 48 m, que constituye el techo del Puelche, por una disminución de la velocidad de perforación y, finalmente, un nuevo incremento de la velocidad, a partir de 51 m, en coincidencia con el desarrollo de las Arenas Puelches.

En la descripción, el Geólogo puso especial énfasis e caracterizar a los componentes geológicos en función de su permeabilidad relativa (Kr).

Luego de alcanzar la profundidad final y con el pozo lleno de inyección, pero sin entubamiento, se puede correr un **perfilaje**, que comúnmente se denomina **eléctrico**.

El **perfilaje eléctrico** en pozos para agua subterránea, normalmente está compuesto por 2 tipos de registros (potencial espontáneo y resistividad).

El **potencial espontáneo (SP)**, mide la diferencia natural de potencial eléctrico entre las unidades geológicas. Esta diferencia, se manifiesta con mayor intensidad en el contacto entre las capas arcillosas y las arenosas. El SP se mide en milivoltios (mV) y la interpretación de su registro, permite establecer cualitativamente la ubicación de los horizontes más permeables (arenas), por un desplazamiento de la curva hacia la derecha (milivoltios mayores), y los menos permeables (arcillas) por un desplazamiento contrario (hacia la izquierda).

Para obtener un buen registro de perfilaje eléctrico, es necesario emplear agua dulce para la inyección, pues el uso de agua salada (más de 2 g/ l) puede producir una inversión de las curvas de SP y resistividad.

En la figura 18 se aprecia un suave desplazamiento de la curva de SP hacia la derecha, entre 18 y 24 m, en coincidencia con la posición del limo arenoso, calcáreo, de media a baja permeabilidad. Otra desviación tenue, hacia mayores mV, se observa a partir de 51 m, coincidente con el techo del Acuífero Puelche.

Picos de bajo SP se dan a los 12 m (limo arcillo arenoso) y a los 27 m (limo arcillo arenoso, calcáreo).

La resistividad, que se mide en ohm.m, consiste en inyectar una corriente eléctrica en la pared del pozo y registrar la intensidad de su retorno, afectada por la constitución litológica y el contenido salino del agua de formación. Si el componente geológico es poco poroso y permeable (tosca), la curva de resistividad se desplazará hacia la derecha (valores mayores); si es poroso y poco permeable (arcilla o limo),

se desplazará hacia la izquierda (valores menores) porque en este caso incide la salinidad.

En los estratos arenosos, con agua de baja salinidad (menor a 1 g/l) la curva se desplaza hacia la derecha (mayor resistividad).

En la figura 18 se registra un marcado desplazamiento de las curvas de resistividad hacia la derecha, en coincidencia con el Acuífero Puelche.

Una de las curvas de resistividad, mide esta propiedad, penetrado pocos cm en las formaciones geológicas (normal corta), la otra (normal larga) lo hace penetrando más profundamente, por lo que su registro está menos influenciado por la invasión del fluido de inyección.

En la figura 18, la resistividad esta expresada en ohm.pie, debido a que el equipo de registración es de origen inglés.

Otro registro que se realiza en las perforaciones de agua, para precisar el perfilaje eléctrico, es el de **rayos gamma**.

Rayos gamma, mide la radiación natural de los componentes geológicos y tiene la ventaja de que puede realizarse también en pozos entubados con PVC o hierro. Es particularmente apropiado para ubicar las capas arcillosas que presentan una emisión radiactiva muy superior a las arenosas, especialmente cuando son de origen marino.

Una vez finalizada la interpretación de los registros realizados en el pozo piloto (cronometraje, muestreo litológico y perfilaje eléctrico) se procede a entubarlo para ensayarlo y tomar muestras de agua del o los acuíferos que se captarán con el pozo definitivo.

Para el entubamiento normalmente se emplea cañería de pequeño diámetro (4 o 6") y filtros preengravados o de pequeña abertura (0,10 a 0,25 mm). Luego de instalado el entubamiento se procede a colocar la bomba para hacer la limpieza, el muestreo para su posterior análisis y, un ensayo expeditivo, a fin de tener una idea del caudal y de la depresión.

El entubamiento, ensayo y muestreo del pozo de exploración, sólo se realizan en los sitios poco conocidos hidrogeológicamente. En aquellos lugares donde se conoce el comportamiento hidrogeológico, como el NE de la Provincia de Buenos Aires, la ejecución del pozo piloto tiene por finalidad precisar la posición de las capas arcillosas, para instalar la cañería camisa y, de las arenosas, para enfrentar los filtros.

4. DISEÑO DEL POZO DE CAPTACIÓN

El diseño de una perforación depende de la finalidad para la que se construya y de las características y comportamiento hidrogeológico de las capas productivas (acuíferos) e improductivas (acuitardos, acuícludos).

El acuitardo (limo arcilloso o arenoso) es una unidad de baja permeabilidad que no puede aportar un caudal apreciable a una perforación, pero que permite el pasaje significativo de una capa a otra, cuando la superficie involucrada es extensa y existen diferencias de potencial hidráulico entre los acuíferos sobreyacente y subyacente al acuitardo (figura 7). Este proceso es el responsable de la

contaminación con nitratos del Acuífero Puelche en el Conurbano de Buenos Aires. El acuicludo (arcilla) es menos permeable que el acuitardo y, a los fines prácticos, puede considerarse impermeable, pese a que la impermeabilidad absoluta no existe en la naturaleza

. DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN

El diámetro de la perforación definitiva o de explotación, depende de varios factores estrechamente relacionados, entre los que se destacan: **caudal requerido, productividad del acuífero, diámetro del entubamiento, características del equipo de bombeo.**

El **caudal requerido**, es uno de los principales condicionantes del diámetro del pozo y su entubamiento, dado que para lograr caudales elevados se necesitan grandes equipos de bombeo, cuya instalación requiere de cañerías de gran diámetro.

La **productividad del acuífero**, es la limitante esencial respecto al caudal que puede obtenerse de un pozo. En un acuífero de baja productividad, como el existente en los basaltos de la Formación Misiones, no se logran caudales elevados aunque se construyan pozos de gran diámetro (20") y se los termine adecuadamente. En el **Acuífero Pampeano**, es muy raro alcanzar 50 m³/h y aún 30 m³/h, lo más común es que los pozos brinden entre 5 y 15 m³/h. En el **Acuífero Puelche**, se suele alcanzar 100 y hasta 150 m³/h en zonas con arenas medianas a gruesas y espesores importantes (mayores a 30 m). En el **Acuífero Ituzaingó**, equivalente al Puelche, pero en Entre Ríos y Corrientes, pozos construidos y terminados en forma precaria (sin filtros) llegan a producir 200 y hasta 400 m³/h.

La productividad de un acuífero depende de su **permeabilidad (K)** o **conductividad hidráulica** y del espesor saturado. La permeabilidad es la resistencia que ofrece el acuífero al movimiento del agua y la

(T) es el producto de la permeabilidad por el espesor saturado.

$$T = K \cdot e$$

T: transmisividad (m²/d)

K: permeabilidad (m/d)

e: espesor saturado (m)

A modo de ejemplo: un acuífero con una K de 1 m/día y 50 m de espesor, tendrá la misma productividad que otro con una K de 10 m/día y 5 m de espesor, porque la transmisividad de ambos es la misma (50 m²/d).

El **diámetro del entubamiento** condiciona al del pozo, porque para que la cañería pueda entrar, el diámetro del pozo tiene que ser mayor. Además, especialmente en los pozos para agua potable y en aquellos que se emplean para abastecer a la industria alimentaria, es necesario lograr una buena aislación para evitar posibles contaminaciones por flujo a través del espacio anular, desde el acuífero freático.

En la figura 19 se aprecia el recorrido descendente del agua freática en un pozo cementado y en otro que no lo está. En el primero (figura 19 A) el flujo debe atravesar toda la sección que va desde la superficie freática hasta el acuífero semiconfinado, recorrido que puede insumir varios meses, con una resistencia mayor aún para atravesar el acuitardo. En este caso el acuífero libre, que puede asimilarse al Pampeano, actúa como un filtro natural efectivo frente a contaminantes como las bacterias, que no sobreviven más de 100 días fuera de su hábitat propicio (pozos negros o absorbentes). En el caso del pozo sin cementación (figura 19 B) y aún sin cañería camisa (figura 19 C), o con un encamisado incompleto (figura 19 D), el flujo descendente se encausa por el espacio anular y llega rápidamente (minutos) al acuífero inferior (Puelche).

Para lograr una buena cementación es necesario disponer de un diámetro de pozo 4" mayor que el diámetro de la camisa.

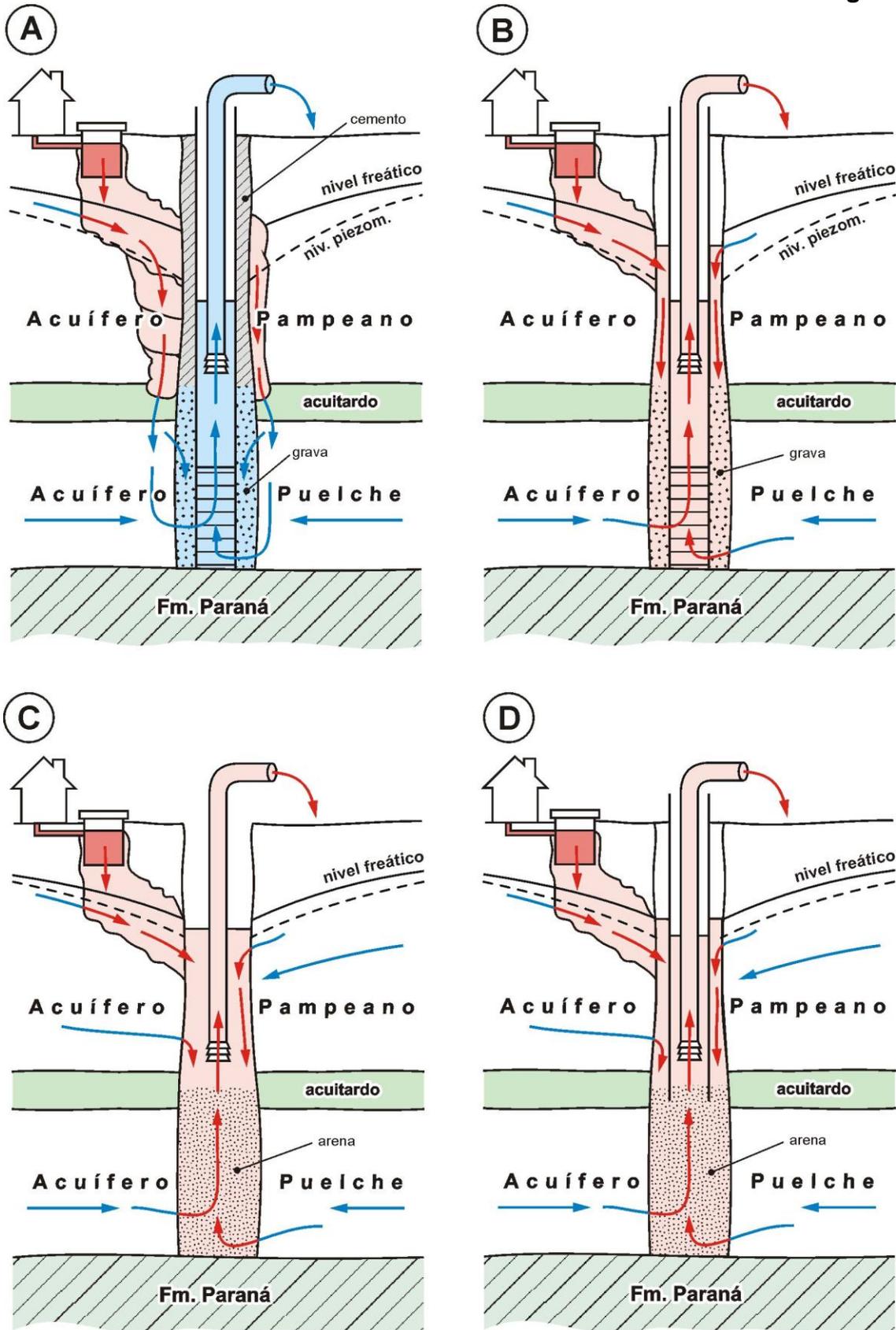
Los equipos de bombeo, tienen diferentes características y rendimientos, y su empleo depende en gran medida de la finalidad perseguida.

Las bombas a émbolo o pistón, que también se denominan de desplazamiento constante, se emplean comúnmente para accionar los bombeadores domésticos, los molinos a viento y las bombas manuales, conocidas como pie de molino. Con estos equipos se logran caudales bajos, en general menores a 5 m³/h y la mayoría de los cilindros que contienen a los émbolos entran en cañerías de 3" y aún de 2".

En algunos sitios donde el agua subterránea se ubica a profundidades considerables (más de 100 m y aún de 200 m) como algunos sectores de La Pampa, Río Negro, Patagonia Extra-andina, Piedemonte Cuyano, etc, para la elevación se emplean bombas a émbolo del tipo doble acción, impulsados por un **martinete** a cable, similar al empleado en la extracción de petróleo.

Las bombas centrífugas aspirantes, de vacío u horizontales, funcionan fuera del agua y su principio operativo se basa en la generación de una presión negativa inferior a la atmosférica. En condiciones ideales, con bombas de este tipo, se puede elevar el agua desde una profundidad máxima de 10,33 m por debajo del suelo. Esta profundidad equivale a 760 mm de mercurio, que es la presión atmosférica media a nivel del mar, e igual a 1 atmósfera y a 1 kg/cm².

Figura 19



A: Pozo encamisado y cementado.

B: Pozo encamisado, sin cementar.

C: Pozo sin encamisado ni cementación. D: pozo parcialmente encamisado, sin cementación.

En la práctica las pérdidas por fricción y la imposibilidad de lograr un vacío perfecto reducen la capacidad de elevación en alrededor del 40%, por lo que ésta queda limitada a unos 6 m. Dado que la cañería de aspiración puede ser de 1" o menos, éstas bombas pueden operar en pozos de pequeño diámetro siempre que el nivel hidráulico no sobrepase los 6 m de profundidad.

Las **bombas centrífugas impulsoras, o sumergidas**, tienen los rotores o impulsores dentro del agua. Este tipo, que generalmente se clasifica en **bombas de eje y con motor sumergido**, se emplea en la obtención de caudales elevados para el abastecimiento de agua potable en los servicios centralizados, para el riego y para la industria. Las cañerías de menor diámetro en que pueden instalarse las bombas centrífugas impulsoras oscilan en 4". En el cuadro 5 se indican los diámetros de cañerías recomendados por la fábrica ROTOR PUMP para colocar sus bombas con motor sumergido, en función del caudal y para cargas hidráulicas de 30, 40 y 50 m. Las diferencias en los caudales son producto de las distintas potencias de los motores

Cuadro 5

CAUDALES EN FUNCIÓN DE LOS DIÁMETROS Y LAS ALTURAS			
Ø CAMISA (pulgada)	ALTURA MANOMÉTRICA (m)		
	30	40	50
	CAUDAL (m ³ /h)		
4	7 a 21	5 a 16	3 a 10
6	20 a 55	18 a 42	17 a 20
8	132 a 162	83 a 147	90 a 132
10	306 a 370	252 a 366	145 a 324

4.2. INSTALACIÓN DE LA CAMISA

La colocación apropiada de la cañería camisa en una perforación es una tarea fundamental para lograr una buena aislación entre acuíferos y evitar la contaminación bacteriológica, o con otras sustancias que pueden ser retenidas o degradarse durante su pasaje del acuífero libre o freático al semiconfinado subyacente. Este es el caso de los acuíferos Pampeano y Puelche en el NE de la Provincia de Buenos Aires.

Ya se mencionó que para lograr una buena cementación de la camisa es necesario contar con un diámetro de pozo al menos 4" mayor que el de la cañería. También resulta conveniente colocar centradores en la camisa (figura 20) para evitar el contacto de la misma con la pared del pozo, pues dicho contacto impediría una correcta cementación.

Hay varias formas de colocar el cemento en el espacio anular entre la pared del pozo y la camisa, pero lo que siempre debe hacerse para lograr una cementación efectiva, es practicarla en forma ascendente; es decir, desde el extremo inferior del caño (zapata) o del pozo, hacia la superficie, porque el vertido del cemento desde la boca del pozo para que descienda por gravedad, generalmente brinda resultados deficientes.

En la figura 20 se reproduce una forma de cementación que consiste en colocar la lechada de cemento en el fondo del pozo y luego bajar la camisa hasta la profundidad final. La camisa, que se baja llena de agua y con un tapón inferior perforable (madera, goma, o plástico) desplaza al cemento hasta la superficie.

Lo que debe calcularse es el volumen de lechada necesario para ocupar el espacio anular entre el fondo del pozo y la superficie. Una forma expeditiva para calcular el volumen que puede contener una cañería, consiste en elevar al cuadrado el diámetro en pulgadas de la misma y dividirlo por 2.

$$\text{Vol. (l/m)} = (\text{Ø}'')^2 / 2$$

El resultado expresa el volumen en litros por metro de caño. Si se tiene que colocar una camisa de 6" en un pozo de 10", el cálculo para establecer el volumen de lechada necesario para cementar el espacio anular es:

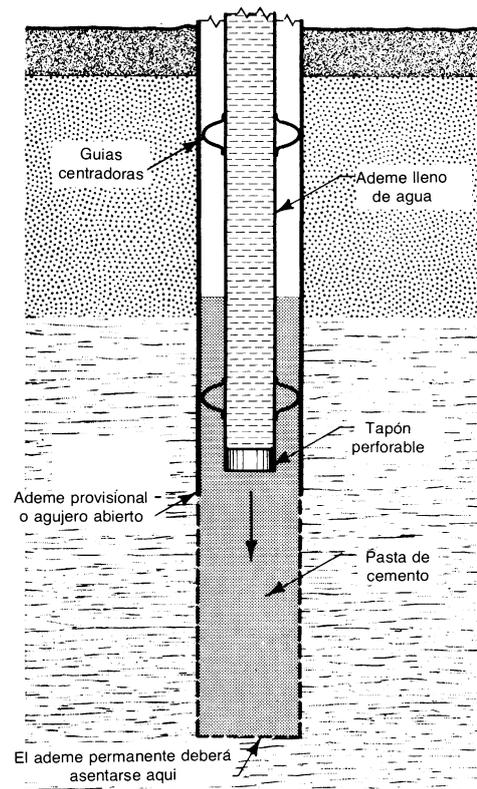
$$\text{Vol. camisa} = 6 \times 6 / 2 = 18 \text{ litros/m}$$

$$\text{Vol. pozo} = 10 \times 10 / 2 = 50 \text{ l/m}$$

$$\text{Vol. espacio anular} = 50 - 18 = 32 \text{ l/m}$$

Si la camisa se prevé bajar hasta 40 m de profundidad, el volumen de lechada necesario será de unos 1.300 litros. Dado que la lechada se prepara con unos 25 litros de agua por bolsa de cemento, la cementación del ejemplo requiere unas 50 bolsas. Para preparar la lechada es conveniente emplear agua dulce (salinidad menor a 1.500 mg/l) y de ser salobre (hasta 3.000 mg/l) lo más importante es que no contenga sulfatos.

Figura 20



Cementación mediante inmersión de la camisa.

Uno de los métodos más empleados en la cementación ascendente, consiste en bajar una cañería para la inyección del cemento, a través del espacio anular y hasta el fondo del pozo (figura 21). Por la cañería, que puede ser de una pulgada, se inyecta una lechada de cemento mediante una bomba centrífuga, con una presión superior al peso de la columna de cemento. La operación se da por finalizada cuando la lechada aparece por la boca del pozo. Para evitar la entrada de cemento en la cañería, el extremo inferior de la camisa, cuando es de hierro, se hinca por golpeo en el fondo del pozo.

Si entre el acuífero superior (freático) y el inferior (semiconfinado) existe un estrato arcilloso (acuitardo) de características litológicas apropiadas (arcilla o limo arcilloso plástico) y espesor considerable (más de 2 m), la cementación puede reemplazarse

mediante el hincado de la zapata de la camisa en el acuitardo. En estos casos, el espacio anular suele rellenarse inyectando un fluido viscoso con base arcillosa o bentonítica.

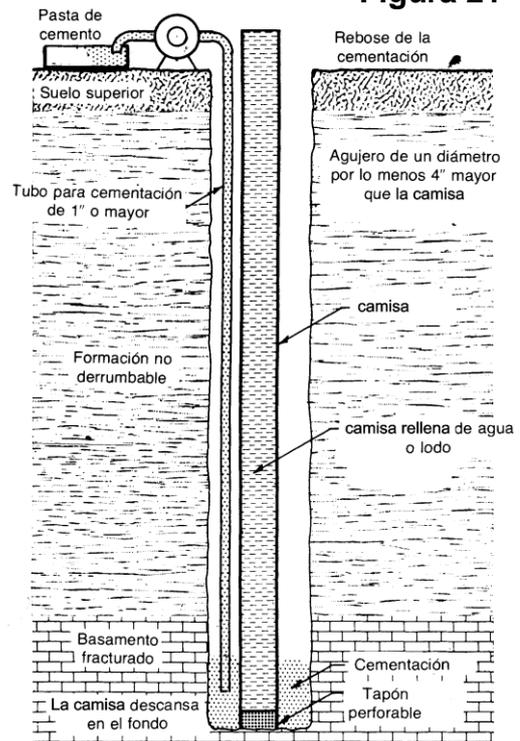
En cualquier caso, una correcta cementación brinda mayor seguridad para la aislación entre acuíferos.

Los materiales más empleados en las cañerías para encamisados son:

- ◆ acero
- ◆ acero con revestimiento galvanizado
- ◆ PVC

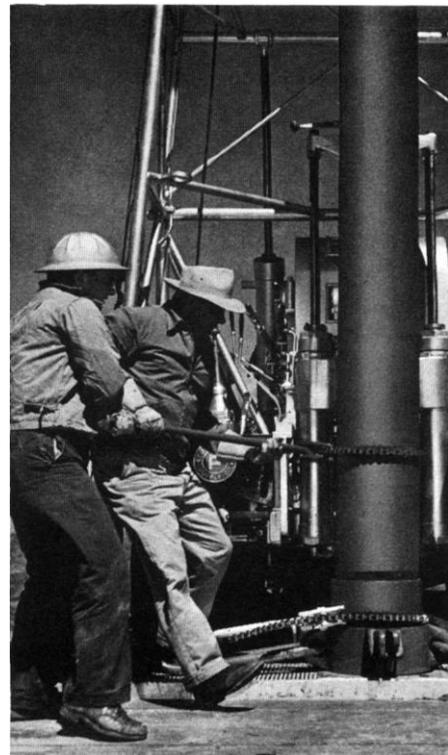
El acero común o negro es ampliamente empleado en el encamisado de pozos, especialmente en el tipo de cañería sin costura, con extremos para roscar (figura 22) o frenteados para soldar (figura 23 A y 23 B).

Figura 21

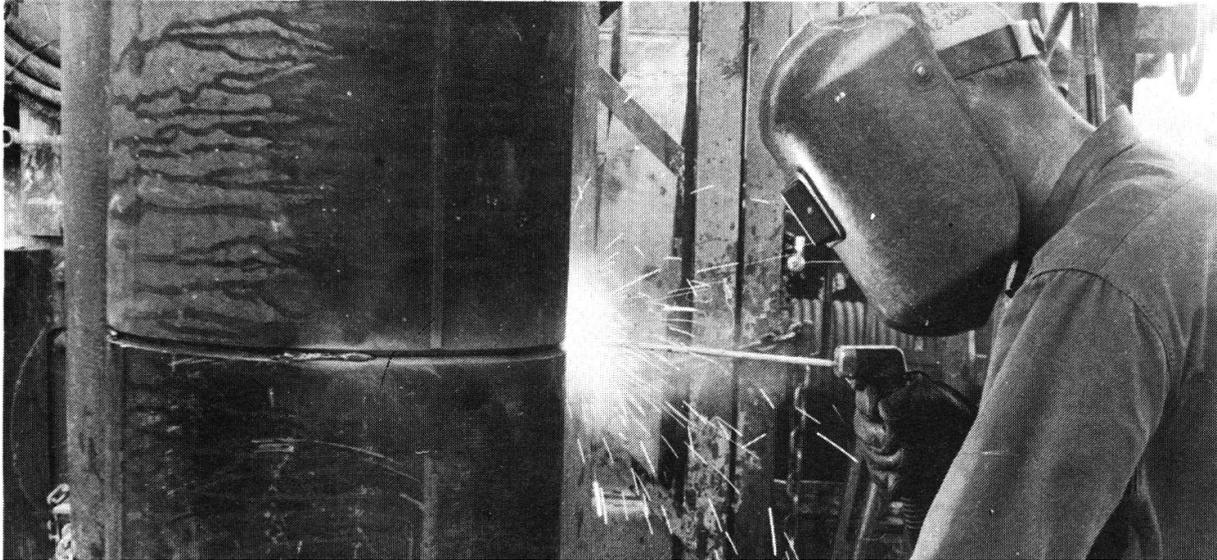


Cementación mediante tubería de inyección.

Figura 22

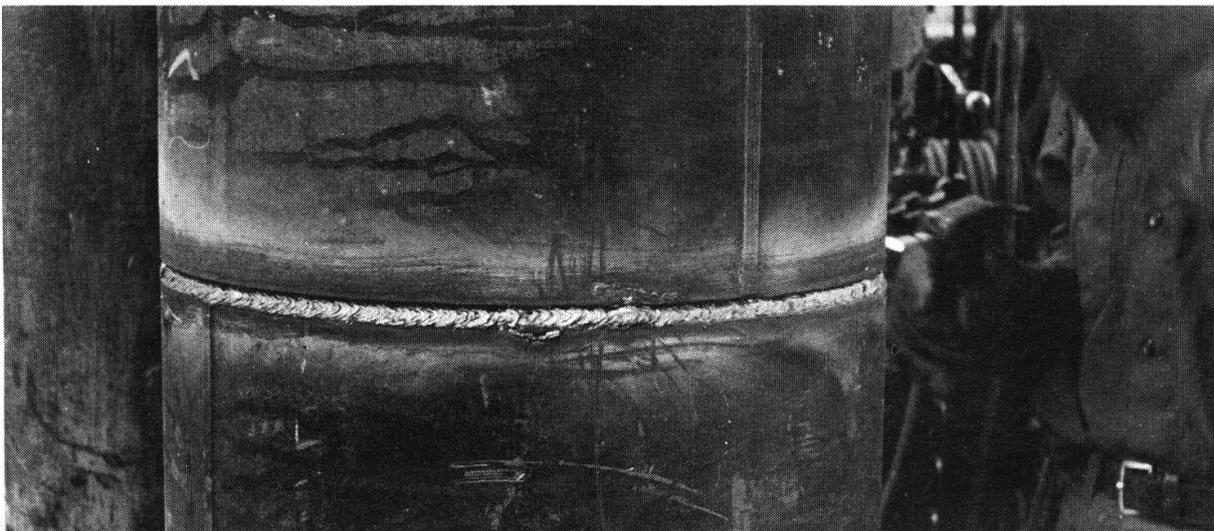


Acople de una cañería camisa con extremos roscados.

Figura 23 A**Acople de una cañería camisa mediante soldadura en los extremos frenteados.**

Las tuberías de acero, con un espesor de 6,35 mm, poseen una resistencia a la tensión del orden de 4 kg/cm², lo que las hace aptas para el tiraje, en caso de ser necesario su extracción o acomodamiento.

También son resistentes a la compresión lateral y axial, lo que permite el golpeo para su hincado. Otra ventaja es su precio, respecto al acero galvanizado y aún al PVC, en diámetros mayores a 6". Su mayor desventaja radica en que es

Figura 23 B**Primer relleno con soldadura de la cañería mostrada en A.**

fácilmente atacable por aguas ácidas, con pH menor de 7, salobres y saladas, especialmente si son cloruradas y/o poseen oxígeno libre.

El acero galvanizado o con cobertura de cinc, es más resistente a la corrosión que el acero negro, pero no se produce sistemáticamente en diámetros mayores a 6". Por ello, además de ser más caro, es necesario encargarlo especialmente, lo que genera demoras en la entrega.

Las cañerías de PVC roscadas, se han difundido en los últimos 15-20 años. Aventajan a las de acero en que son mucho más resistentes a la oxidación y a la corrosión. La mayor desventaja es su menor resistencia a la tracción y a la compresión, lo que limita la capacidad de tiraje para la extracción y el golpeo para el hincado. El precio del PVC reforzado en diámetros mayores a 6", es prácticamente el mismo que el del acero negro.

4.3. VERTICALIDAD, ALINEAMIENTO Y AISLACIÓN

La **verticalidad** de un pozo está referida a su posición respecto a la de la plomada, mientras que el **alineamiento** se refiere a su relación con una línea recta.

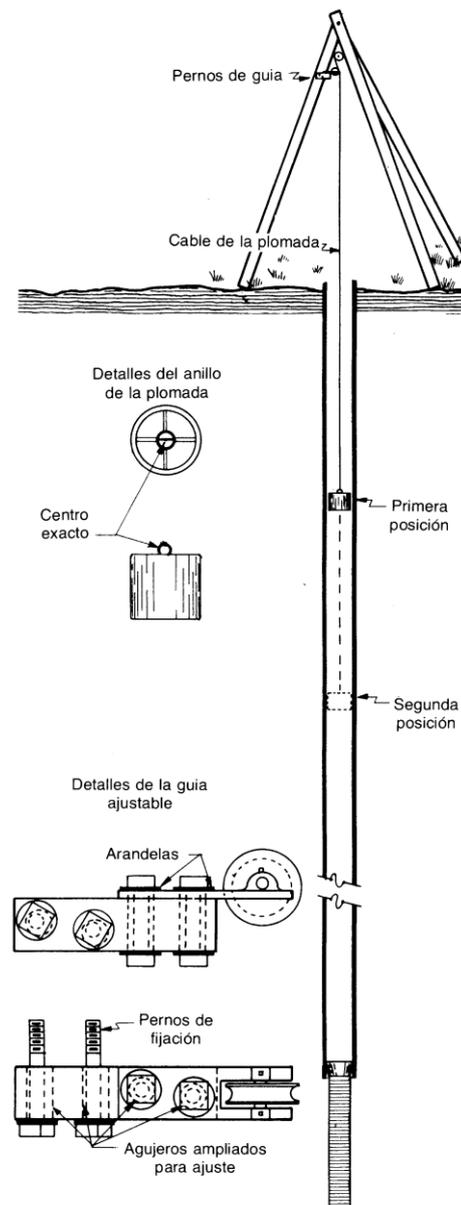
Las desviaciones en la verticalidad y en el alineamiento, fundamentalmente en las perforaciones de más de 100 m, pueden derivar, en el primer caso, en inconvenientes para la colocación de la camisa y en el segundo, para la instalación y el funcionamiento de la bomba.

Los factores que inciden en la desviación de un pozo pueden ser naturales, como las características geológicas del subsuelo o artificiales como la forma de perforar, el equipo y tipo de herramienta empleados, etc

En depósitos aluviales, constituidos por materiales gruesos (rodados) y resistentes (cuarcitas), es común que un rodado grande sea triturado sólo parcialmente por el trépano y que el trozo entero, desvíe la herramienta hacia un costado. La desviación también es frecuente cuando existe buzamiento (estratos inclinados).

La excesiva presión ejercida por las barras sobre el trépano puede producir el pandeo de éstas y desviar una perforación rotativa. Otro motivo de desviación frecuente es un avance demasiado rápido de la

Figura 24



Equipamiento para medir la desviación de un pozo.

herramienta, o un equipo con un cuadro de maniobras poco resistente respecto al peso de las barras, portamecha y trépano.

Las desviaciones excesivas pueden dificultar y aún impedir la colocación de la camisa, especialmente cuando el espacio anular es pequeño.

En la figura 24 se esquematiza un tipo de equipamiento para registrar la desviación de pozos.

El peso o plomada es de tipo cilíndrico, con un diámetro 10 mm menor que el diámetro de la camisa y se sujeta con un cable que debe pasar por el centro del pozo a nivel de su boca. Para lograr la centralización se emplea una guía ajustable que se coloca a 3 m por encima del extremo superior de la camisa. La desviación se toma haciendo descender la plomada hasta el fondo del pozo y midiendo el desplazamiento del cable cada 3 m, respecto a la pared interior del encamisado. La desviación puede obtenerse mediante el producto del desplazamiento del cable por la longitud total del mismo, dividiendo la distancia fija entre la guía ajustable y la boca del pozo.

Ejemplo: si el desplazamiento del cable a 40 m fue de 6 cm, la desviación a esa profundidad es

$$\frac{(40 + 3) \times 6}{3} = 86 \text{ cm}$$

En la figura 25 se indica la desviación en pulgadas de un pozo de 160 pies de profundidad. En el gráfico se aprecia que el pozo es vertical hasta 40' y que experimenta una desviación de 1,3" hasta 110', para incrementarse por debajo de esa profundidad hasta 3,8" a 160'.

Para verificar si la **aislación** de la camisa es correcta, se procede a agregar o quitar agua de la misma para generar una diferencia apreciable de potencial hidráulico entre el interior del caño y el exterior del mismo (nivel freático).

Si el nivel freático se ubica a poca profundidad (menos de 10 m), es conveniente sacar agua de la camisa hasta lograr una diferencia de potenciales de al menos 20 m (2 kg/cm²). Si la profundidad del nivel freático es mayor de 20 m, conviene agregar agua hasta la boca del pozo o su cercanía.

Si la camisa no presenta sitios con fugas (roscas, soldaduras) el nivel de agua en su interior prácticamente no sufrirá variación al

Figura 25

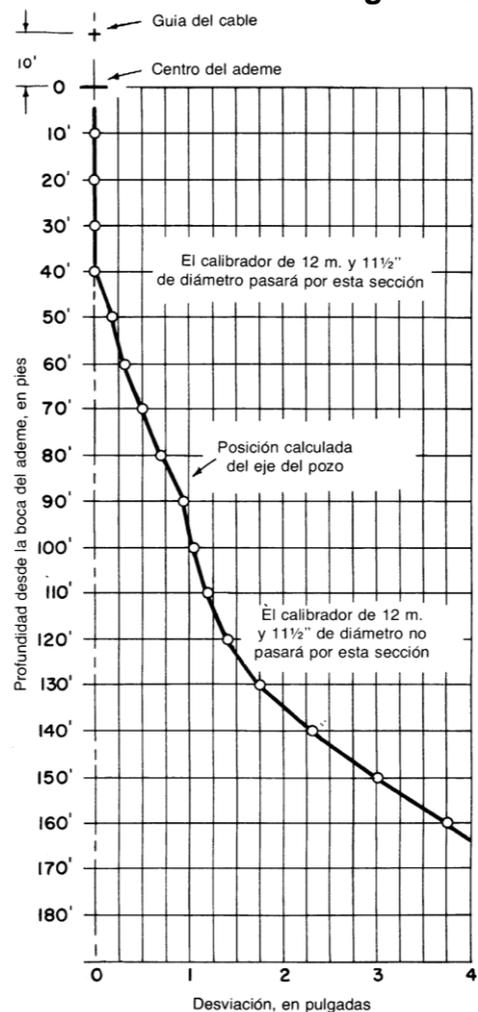


Gráfico de desviación en relación a la profundidad.

cabo de 24 horas.

La tolerancia normalmente es del 0,25% respecto a la diferencia de carga hidráulica generada por el agregado o extracción de agua.

Ejemplo: si la diferencia hidráulica entre el interior y el exterior de la camisa es de 20 m, al cabo de 24 hs. se tolera una variación del nivel interior de 5 cm.

Para efectuar la prueba de aislación es conveniente que el cemento penetre 20 o 30 cm por la zapata, dentro de la camisa, formando un tapón, que luego será eliminado al proseguir la perforación.

5. FILTRO

El filtro es uno de los componentes más importantes para el correcto funcionamiento de un pozo para la extracción de agua.

Básicamente, consiste en un caño o tubo con orificios a través de los cuales ingresa el agua contenida en un acuífero, pero no el material granular natural de la formación productiva, ni el que se hubiese agregado artificialmente (engravado).

Un filtro eficiente debe permitir el ingreso a la perforación, durante las tareas de desarrollo, de los componentes finos naturales del acuífero y de los introducidos artificialmente durante la ejecución del pozo. De esta forma se logra un incremento de permeabilidad en la vecindad del filtro, que puede aumentar considerablemente con el engravado artificial.

El uso de mallas de aberturas pequeñas para detener el paso del material fino, resulta eficiente para dicha finalidad, pero no para la obtención de caudales importantes. En definitiva, una malla puede impedir el paso de una arena muy fina, pero también limita significativamente el ingreso de agua.

5.1. TIPOS DE FILTRO

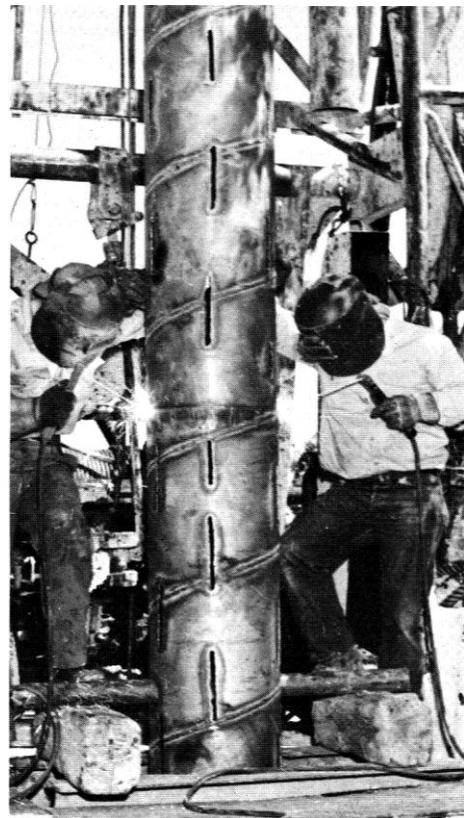
De acuerdo a la forma y distribución de los orificios o aberturas, los filtros tienen diferente denominación y capacidad filtrante. Los más empleados en pozos para agua son:

- ◆ filtros ranurados
- ◆ filtros agujereados

Los filtros ranurados pueden construirse manualmente, mediante el empleo de una sierra, o de un soplete para cortar el caño. En el primer caso los cortes se hacen transversalmente al eje del caño, pero con el soplete de acetileno, pueden efectuarse en el mismo sentido o paralelamente al eje (figura 26). El ranurado también puede fabricarse industrialmente empleando tornos cortadores. La superficie filtrante o abierta en los filtros ranurados por corte rara vez llega al 10% de la superficie total de la cañería y suele ser menor al 5% en los filtros ranurados a soplete. Otro inconveniente de estos últimos es el excesivo tamaño de la ranura y su forma irregular (figura 26).

Uno de los filtros ranurados industrialmente, de mayor uso en los pozos de agua, es el del tipo persiana o celosía, pues las ranuras se protegen mediante una cobertura

Figura 26

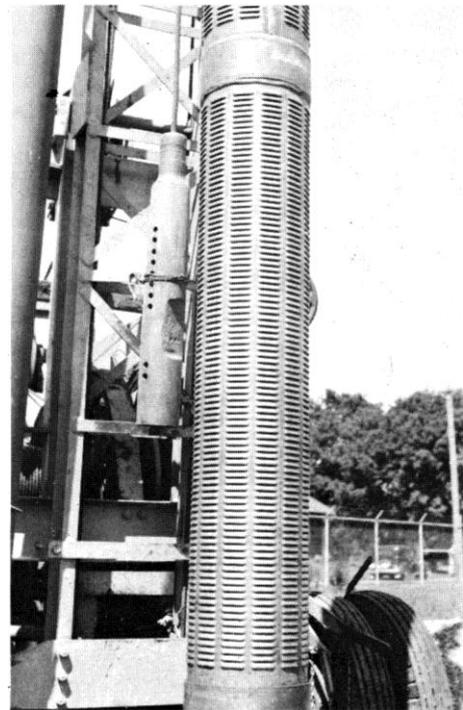


Cañería ranurada verticalmente con soplete. La superficie abierta es muy escasa y las ranuras muy anchas.

similar a una celosía (figura 27). Con estos filtros, de acuerdo al tamaño de la abertura, se logran superficies filtrantes del orden del 10%.

El filtro con más área abierta, y que por lo tanto permite un mayor pasaje de agua, es el de ranura continua, desarrollado por la firma Edward Johnson. El mismo consiste en un filamento metálico enrollado en forma continua, alrededor de otros dispuestos axialmente, cuya función es otorgarle resistencia y que por lo tanto actúan como esqueleto del filtro. Este tipo de filtro tiene una superficie abierta del orden del 20% y además, la ventaja de que puede fabricarse con una abertura entre 0,1 y más de 3 mm. Actualmente es uno de los más empleados y puede conseguirse en acero negro, galvanizado e inoxidable. En la figura 28 A se indica la forma como se enrolla el filamento periférico, que se suelda en los cruces con cada una de las nervaduras de soporte. En 28 B se muestra un detalle del filamento y las nervaduras.

Figura 27



Filtro tipo persiana o celosía, en tramos de 1,5 m.

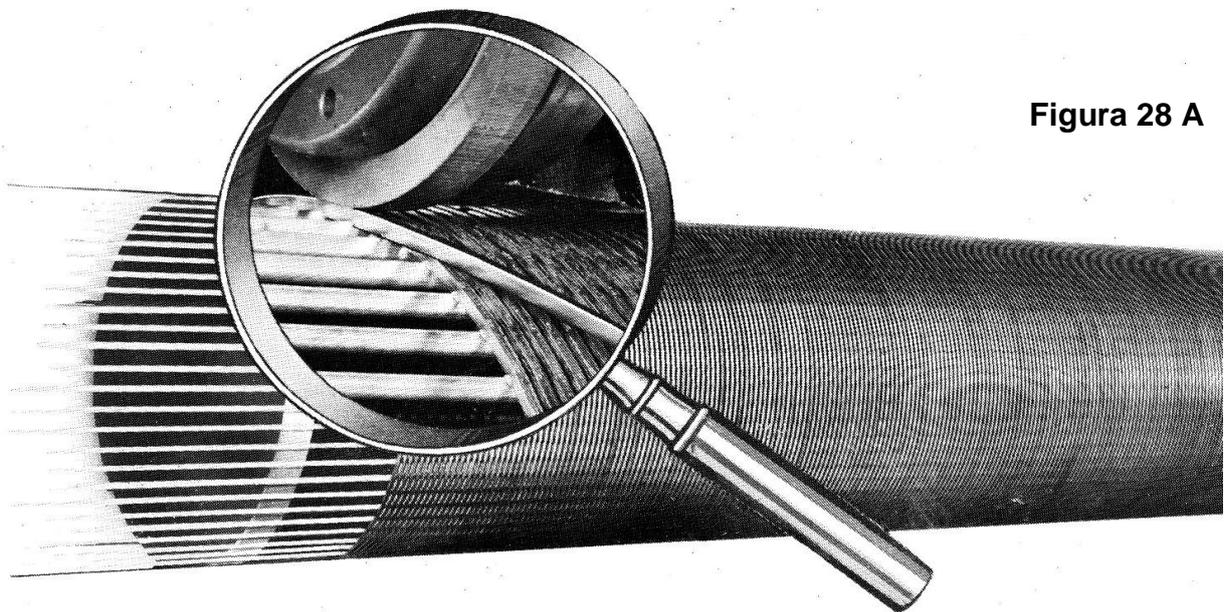


Figura 28 A

Enrollado del filamento en un filtro de ranura continua tipo Johnson. El filamento va soldado a las nervaduras en cada cruce.

5.2. ELECCIÓN DEL FILTRO

La elección del filtro, en lo referente al tipo, tamaño y distribución de la rejilla, al material y al diámetro, depende del uso previsto para la perforación (doméstico, agua potable, riego, industria, ganado), del caudal requerido, y de la productividad y tipo de agua del acuífero.

En pozos de agua domésticos equipados con bombeadores, bombas centrífugas horizontales, o eductoras, que normalmente no requieren más de 5 m³/h, el filtro puede construirse ranurando con sierra de 1 mm, una cañería de PVC reforzada de 2 o 3". Con este tipo de filtro se logra una superficie abierta o efectiva del orden del 5% del total de la cañería, con lo que el de 2" alcanza un rendimiento de 900 litros/hora por metro y el de 3"

1,3 m³/h.m, para una velocidad de entrada del agua a través de las ranuras, de 108 m/h (3 cm/seg). En estas condiciones, 5 m³/h pueden obtenerse con un filtro del orden de 5 m de longitud. Como se verá en el punto longitud del filtro, al área abierta de la rejilla fuera del pozo, hay que quitarle aproximadamente un 30%, debido a la obturación que inevitablemente sufrirá la misma, sea por el componente natural o por el engravado artificial, cuando el filtro se coloca en la perforación.

Cuando el caudal requerido es mayor de 5 m³/h, es necesario instalar un filtro maquinado industrialmente. Para caudales hasta 40 - 50 m³/h, los filtros ranurados del tipo persiana suelen funcionar correctamente; por encima de ese valor, es aconsejable emplear filtros con ranura continua, que también se pueden utilizar para caudales menores.

En lo referente a los materiales, los más empleados son el acero negro, galvanizado e inoxidable, y el PVC.

El acero negro es el más barato, pero también el más afectado por los procesos de corrosión y de incrustación. El acero galvanizado tiene un precio y una resistencia intermedios, entre el acero negro y el inoxidable.

Es recomendable el uso de filtros de acero inoxidable en acuíferos con aguas ácidas (pH menor de 7), de salinidad elevada (más de 3 g/l), con elevado oxígeno disuelto, o de alta dureza (más de 400 mg/l de CO₃Ca). En los tres primeros casos para atenuar la corrosión y en aguas duras, para eliminar incrustaciones de CO₃Ca, mediante el ataque con ácido clorhídrico.

Filtros ranurados de PVC, con un espesor de pared de 12 mm, son resistentes a la compresión y a la corrosión, pero poseen baja capacidad de filtración, con un área abierta menor al 10%.

El diámetro del filtro no incide significativamente en el caudal. Considerando un pozo ideal (sin pérdidas de carga), la duplicación del diámetro redundaría en un incremento del caudal menor al 15%.

Figura 28 B



Detalle del filamento y las nervaduras en un filtro de ranura continua.

En un pozo real (con pérdidas del carga) para una velocidad de entrada del agua a través de la rejilla de 3 cm/seg, la firma Johnson da para un diámetro de 6" un caudal de 15 m³/h por metro de filtro y para otro de 12" 20 m³/h.m, en ambos casos para una abertura de 1 mm (cuadro 6). En el cálculo de los rendimientos mencionados, no se tuvo en cuenta la obturación de una parte de la rejilla al instalar el filtro en el interior del pozo, que aunque es difícil de precisar, se estima en un 30%. Por lo tanto dichos rendimientos serán un 30% menores, con los filtros en condiciones operativas.

Cuadro 6

FILTROS DE RANURA CONTINUA JOHNSON

CAUDALES MÁXIMOS TÉORICOS EN LITROS POR HORA

Por metro de largo de Filtro calculados en base de una velocidad de entrada de 3 cm por segundo

Ø Interior del filtro	RANURA #				
	20 (0,5 mm)	30 (0,75 mm)	40 (1 mm)	60 (1,5 mm)	80 (2 mm)
63 mm (2½ ")	3.800	5.300	6.600	8.800	10.500
75 mm (3")	4.400	6.200	7.700	10.200	12.200
102 mm (4")	5.800	8.100	10.100	13.300	15.900
127 mm (5")	7.000	9.800	12.300	16.300	19.400
152 mm (6")	8.400	12.000	15.000	19.800	23.700
203 mm (8")	11.200	15.600	19.500	25.900	30.900
254 mm (10")	9.300	13.300	17.000	23.300	28.700
305 mm (12")	11.100	15.800	20.100	27.700	34.100
355 mm (14")	12.800	18.200	23.300	32.000	39.300

En definitiva, el rendimiento final de un pozo es función de la productividad del acuífero, que depende de su permeabilidad y espesor saturado (transmisividad), a lo que debe adicionarse la eficiencia del filtro y del componente vecino al mismo (engravado y/o material de formación). La depresión total generada por el bombeo es la suma de la resistencia que opone el acuífero a la circulación del agua, más la generada por el engravado y el filtro.

$$s_t = a.Q + b.Q^n$$

s_t: depresión total **a**: resistencia del acuífero (permeabilidad) **b**: resistencia del engravado y el filtro **Q**: caudal.

El primer término de la ecuación considera un flujo de tipo laminar ($a.Q$) y el segundo ($b.Q^n$) un flujo no laminar, en el que las pérdidas de carga son mayores.

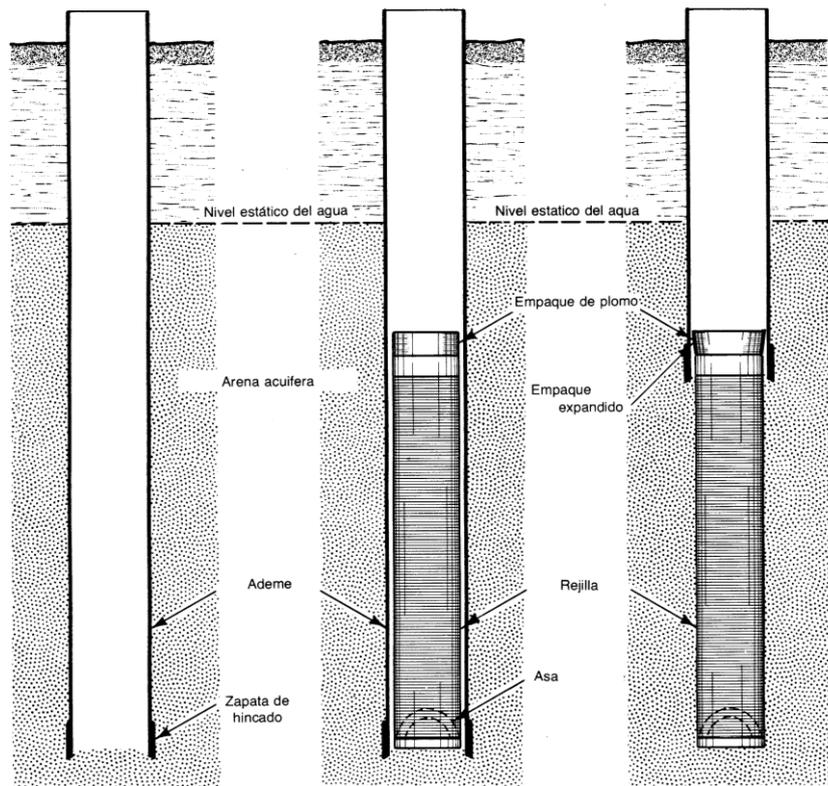
Es evidente que un acuífero de baja productividad no podrá brindar un caudal elevado al pozo, aunque el filtro tenga un alto rendimiento. Opuestamente, un pozo mal terminado o con filtros de bajo rendimiento, en un acuífero de alta productividad, puede restringir significativamente el caudal. En este sentido, además del filtro, el correcto desarrollo del pozo es otro de los factores fundamentales que inciden en su rendimiento.

5.3. INSTALACIÓN DEL FILTRO

La colocación del filtro depende del diseño elegido y del sistema de perforación empleado.

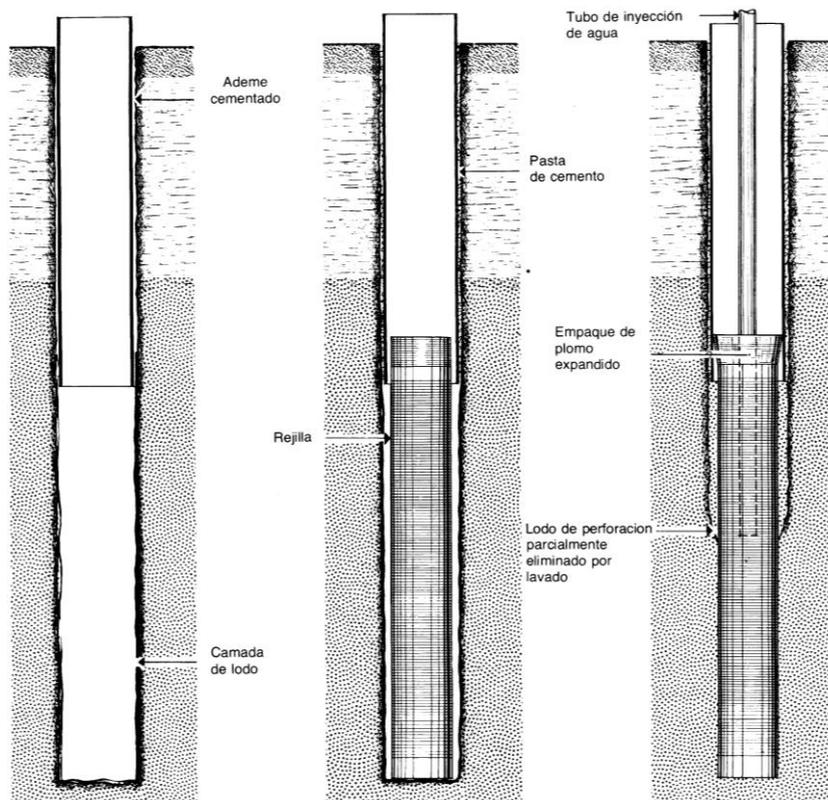
En los pozos ejecutados por percusión a cable, es común bajar una cañería de maniobra o camisa temporaria hasta el fondo (figura 29) y, luego de colocar el filtro, ir levantándola a medida que se agrega la grava. El anillo de grava no debe quedar por debajo del extremo inferior de la cañería de maniobra, pero tampoco debe ascender más de 0,5 o 1 m por encima del mismo, pues puede, al friccionar, arrastrar el filtro hacia arriba junto con la maniobra. La cañería de maniobra también puede emplearse por dentro de la camisa definitiva, después del cementado, pero la reducción de diámetros disminuye el espesor del cilindro de grava.

Figura 29



Cañería de maniobra para la colocación del filtro y la grava.

Figura 30

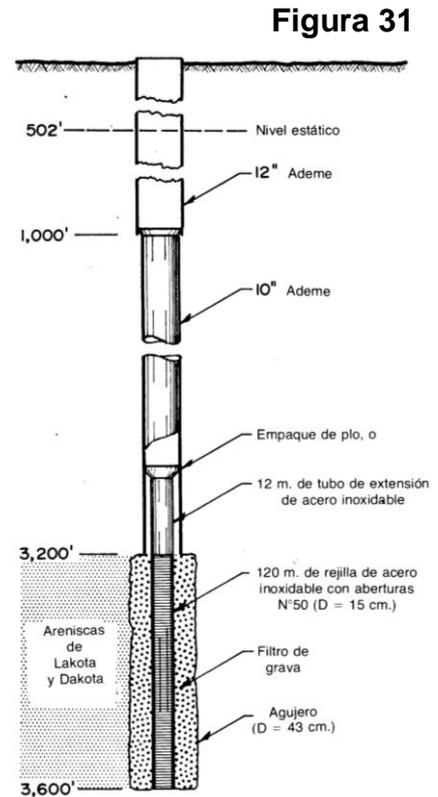


El diámetro del pozo es 4" mayor que el del filtro.

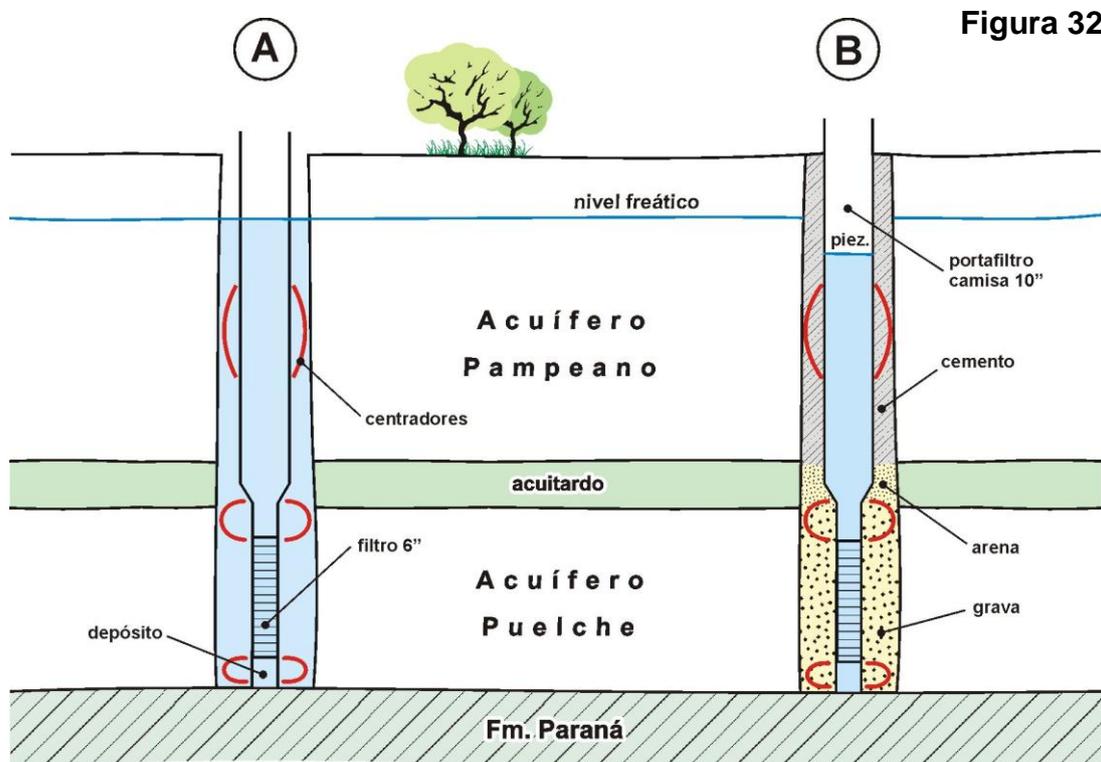
Menos común es la instalación del filtro abierto en su extremo inferior, cuchareando por dentro y agregando grava por el espacio anular. Una vez alcanzada la profundidad final, se coloca un tapón de plomo o cemento en el caño depósito que continúa por debajo del filtro.

En las perforaciones ejecutadas a rotación, el filtro generalmente se instala luego de cementar la camisa, para cuyo fragüe, deben transcurrir al menos 72 horas, pero con los aceleradores se puede reducir el tiempo a 24 hs. El diámetro de la perforación debe ser al menos 4" mayor que la periferia del filtro, para que el engravado funcione correctamente (figura 30). El empleo de ensanchadores, de apertura mecánica o hidráulica, permite ampliar significativamente el diámetro en el sector productivo, para lograr espacios anulares de 5 a 10" (figura 31).

Otra forma de colocar el filtro es acoplarlo a una cañería portafiltro permanente, del mismo diámetro o mayor, para admitir al equipo de bombeo. En este caso, la cementación se practica



Diámetro del pozo ampliado, mediante el empleo de un ensanchador.



A: entubamiento previo al engravado y la cementación.

B: pozo terminado con arena por encima de la grava, para evitar el descenso del cemento.

por encima del engravado y, para evitar el descenso del cemento y la obturación del espacio poral de la grava, la parte superior del cilindro de grava, se termina con arena de construcción, fina o mediana (figura 32).

5.4. ENGRAVADO

La colocación de un prefiltro, comúnmente llamado de **grava**, aunque es frecuente emplear arena mediana o gruesa, tiene por finalidad evitar la entrada al pozo de la arena fina de formación, luego de completar el desarrollo del mismo. El prefiltro además, aumenta considerablemente la permeabilidad en la vecindad del filtro, que es donde se produce un incremento notable de la velocidad que genera fuertes pérdidas de carga, debido al pasaje de **flujo laminar a turbulento**.

De la comparación entre la ecuación de Darcy para flujo laminar en medio poroso:

$$Q = K.i.A \quad \text{y la fundamental de la hidráulica: } Q = v.A$$

Q: caudal **K:** permeabilidad **i:** gradiente hidráulico **A:** sección o área de pasaje
v: velocidad

se desprende que:

$$v = K.i$$

Dado que K es una constante, propia del componente litológico de cada unidad hidrogeológica, pero que varía con la viscosidad del agua, para la misma sección de pasaje, la velocidad y por ende el caudal, son proporcionales a la primera potencia del gradiente hidráulico. Esta condición es la que tipifica al flujo laminar. En definitiva, lo antedicho implica que un incremento en el gradiente hidráulico, se traducirá en un incremento equivalente en la velocidad y en el caudal.

En condiciones de **flujo no laminar**, la ecuación de Darcy se transforma en:

$$Q = K.i^{1/n}.A$$

$$v = K.i^{1/n}$$

Un valor que suele adoptarse para **flujo no laminar turbulento** es **n = 2** por lo que, en régimen turbulento, la velocidad es proporcional a la raíz cuadrada del gradiente hidráulico.

$$v = K.\sqrt{i}$$

Esto explica la brusca disminución en el caudal específico o rendimiento de un pozo, cuando se supera cierto valor de Q, denominado **caudal crítico** y que generalmente se da cuando se pasa de **flujo no laminar transicional** $1 < n < 2$ a **flujo turbulento** $n \leq 2$.

La correcta elección de un prefiltro, está supeditada a la representatividad del muestreo litológico, con la finalidad de identificar los tramos más y menos permeables del acuífero. Para ello, lo más conveniente es tomar las muestras con sacamuestras en perforaciones de poco diámetro (3 o 4"), pero esta práctica es poco empleada en las perforaciones hidrogeológicas. Además, no es fácil evitar la pérdida por lavado de una muestra de arena o grava suelta, cuando se extrae el muestreador. En este tipo de material da buenos resultados un muestreador basado en la retención por aspiración, para lo cual está provisto de un cilindro y un émbolo en la parte superior, al que se hace succionar, levantándolo con una varilla, luego de que la muestra haya ingresado en el tubo sacamuestra (figura 33).

El muestreador también se emplea como herramienta de perforar, para lo que se le adicionan aletas o pastillas de acero al tungsteno. En la figura 33 el émbolo está en posición de succión, luego de que el muestreador efectuara su recorrido de 3 m dentro de la arena. El muestreador posee bisagras para abrirlo axialmente, lo que permite ver en forma directa la litología y la distribución de los diferentes tamaños de grano.

Luego de identificar la o las secciones más permeables para enfrentar los filtros, hay que decidir si es necesario engravar artificialmente o no.

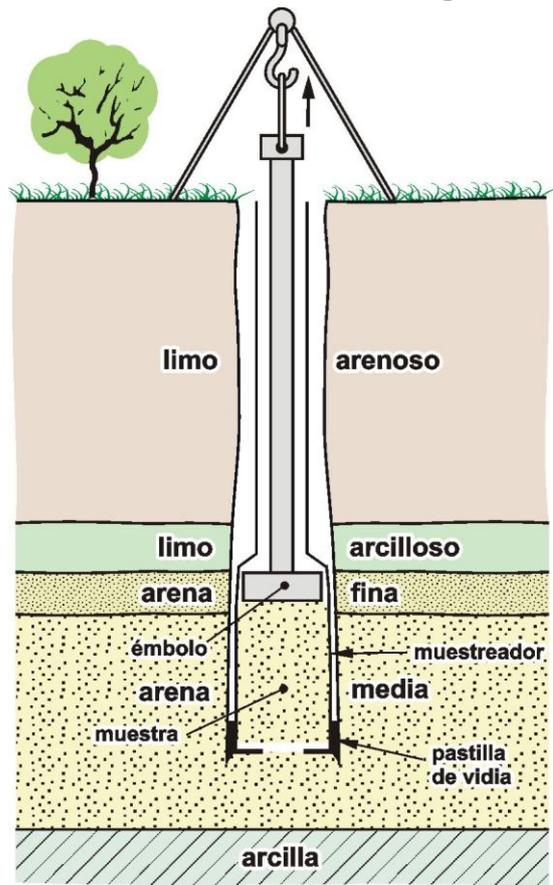
La instalación de un prefiltro mediante el agregado de grava, se hace necesario en los acuíferos granulares uniformes y suelos, típicamente arenosos, de tamaños mediano a fino. En aquellos formados por materiales heterogéneos (amplia variación de tamaños) como gravas arenosas, puede evitarse el **engravado artificial** y efectuar uno **natural**, aprovechando las características granométricas de la formación productiva.

En acuíferos como el Puelche, la uniformidad y el tamaño del grano, hacen necesario el engravado artificial.

La decisión sobre si es conveniente engravar o no y la elección del tamaño de la grava, se basa en el análisis granométrico de las secciones productivas.

La técnica más empleada para el estudio de la variación de tamaños en muestras de arena y grava, es la del **tamizado**. Para ello se utiliza una serie de tamices, dispuestos de forma que el que tiene la malla con mayor abertura, esté en

Figura 33



Muestreador a émbolo para arena y grava sueltas.

Figura 34

la parte superior de la serie y el de menor abertura, en la inferior (figura 34). A los tamices, luego de encastrarlos entre sí y de colocar la muestra en el superior, se los hace vibrar y saltar mediante un equipo del tipo **rot up**. Para que no se pierda material durante el tamizado, en el extremo inferior de la serie se coloca un fondo sin cribas. Para lograr un correcto tamizado, la muestra debe estar seca.

Elegida la serie de tamices en función de la granometría dominante (figura 34), se pesa la muestra, se la coloca en el tamiz superior y se inicia el tamizado. Después de 10 o 20 minutos, se detiene el vibrador y se pesa el material retenido en cada tamiz, comenzando por el extremo superior; la suma de los pesos retenidos en cada tamiz más el fondo, debe ser equivalente al peso de la muestra inicial, con una tolerancia del 1%.

Dado que los tamices con mayor abertura se disponen por encima de los de menor abertura, el tamaño retenido por el tamiz sobrepuesto, también lo será por todos los que

le siguen por debajo. En función de esto lo que se hace es acumular los pesos retenidos por los tamices, para elaborar una curva acumulativa de tamaños (figura 35). Parámetros como: **coeficiente de uniformidad (Cu)**, **diámetro efectivo (De)** y **diámetro medio (Dm)**, son los que se emplean para establecer si es conveniente colocar un engravado artificial y para elegir el tamaño de la grava, y por ende la abertura del filtro.

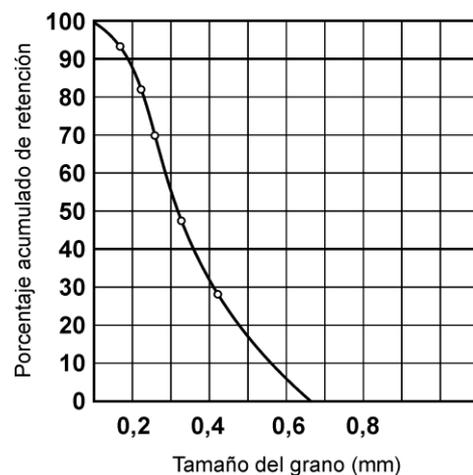
De la figura 35 se desprende que el 90% de la muestra analizada tiene granos con un tamaño mayor de 0,2 y sólo el 10% de los clastos tiene menos de 0,2 mm. Al diámetro correspondiente al 90% retenido en peso, se lo denomina **diámetro efectivo**, en este caso 0,2 mm.

Otro parámetro que se emplea para decidir sobre el tipo de engravado más conveniente (artificial o natural) es el **coeficiente de uniformidad**, que es el cociente entre los tamaños correspondientes al 40 y el 90% retenidos en peso.



Serie de tamices para análisis granométricos.

Figura 35



Curva granométrica acumulativa.

$$Cu = \frac{\emptyset 40\%}{\emptyset 90\%}$$

El **Cu** es adimensional y un valor de 1 indica una selección o uniformidad perfecta, por lo que es prácticamente imposible que se dé en la naturaleza. Para Cu entre 1 y 2,5 el material se considera uniforme o con buena selección (homogéneo) y por encima de 2,5 la selección pasa a ser pobre o mala (heterogéneo).

De acuerdo a Ahrens (1957) es necesario engravar artificialmente un acuífero granular suelto, cuando el diámetro efectivo es menor de 0,3 mm y el coeficiente de uniformidad menor de 2,5. Si el material de formación no cumple con uno de los dos parámetros, también recomienda el agregado de grava (engravado artificial).

De ser necesario el engravado artificial, el tamaño de la grava se elige multiplicando por 5 el diámetro correspondiente al 50% retenido en peso (Dm).

De la curva acumulativa representada en la figura 35 se desprende que:

$$\begin{aligned} D_e &= 0,20 \text{ mm} \\ \emptyset(40) &= 0,35 \text{ mm} \\ \emptyset(50) &= 0,31 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$Cu = 0,35/0,20 = 1,75$$

El coeficiente de uniformidad es menor de 2,5 y el diámetro efectivo es menor de 0,3 mm, por lo que resulta necesario agregar grava. Para elegir el tamaño medio de la grava, se multiplica el diámetro medio de la muestra (Dm) por 5 (0,31 x 5 = 1,55 mm). Por lo tanto la grava a emplear sería la # 12, con diámetros extremos de 1,5 a 2 mm (cuadro 7). Para este tipo de grava, se puede emplear un filtro con una ranura de 1 mm.

Si la perforación está prevista para un caudal de 60 m³/h y el acuífero está en condiciones de brindarlo, sería necesario un filtro de 5,2 m de longitud, con una abertura de 1 mm (# 40) para una velocidad de pasaje del agua a través de la rejilla de 3 cm/seg.

En el cuadro 6 se indica el rendimiento de filtros de ranura continua, para diferentes diámetros y aberturas de las rejillas. De acuerdo al fabricante, el rendimiento del filtro elegido (Ø 6" # 40) es de 15 m³/h por metro de longitud; esto sin considerar la obturación que, como se señaló en 5.2, puede estimarse en un 30 %. De allí surge la longitud de 5,2 m citada en el párrafo anterior.

Para el correcto funcionamiento del prefiltro, el espesor del cilindro de grava debe ser de al menos 2" (5 cm); por lo tanto la formación productiva (acuífero) debió perforarse con por lo menos 10". Un mayor espesor del prefiltro (4") redundaría en un mejor funcionamiento del pozo, al aumentar considerablemente la permeabilidad a una distancia a 0,10 m de la pared exterior del filtro, lo que se traduce en una disminución de las pérdidas de carga por flujo no laminar. Para incrementar el espesor del cilindro de grava, pueden utilizarse ensanchadores, tal como se citó en 5.3.

Durante el vertido de la grava, que es conveniente realizarlo con una cañería para engravar, a fin de disipar el efecto de segregación por tamaños, se hace necesario circular con agua limpia, inyectada dentro del filtro para evitar el derrumbe del acuífero y bajar la viscosidad de la inyección.

Para estimar la cantidad de grava necesaria, se multiplica el volumen del espacio anular por la longitud a engravar. En el ejemplo, el espesor es 2" (5 cm) y si la longitud a engravar fuese 30 m, el volumen necesario sería del orden de 1 m³. Para estimar el peso, se multiplica el volumen por la densidad media de la grava (1,5 g/cm³) (cuadro 7) lo que brinda 1.500 kg de grava, pero como la porosidad o huecos es del orden del 20%, el peso final está en el orden de 1.200 kg, aunque si el acuífero está formado por arenas sueltas y limpias, caso del Puelche, no es conveniente realizar la corrección, debido a que el agujero puede ser bastante mayor que el diámetro del trépano.

Una grava adecuada es aquella que cumple con los siguientes requisitos:

- bien redondeada y uniforme ($Cu \leq 1,5$)
- sin clastos calcáreos
- con muy poca mica (menos del 2%)
- con clastos silíceos (cuarzo, cuarcita, calcedonia)
- sin hierro ni arcilla

La redondez incide en la porosidad; a medida que aumenta la redondez, aumenta la porosidad. La uniformidad es uno de los factores que incide en la permeabilidad (a mayor uniformidad mayor permeabilidad).

Los clastos calcáreos pueden disolverse y precipitar rápidamente, por pérdida de CO₂ al disminuir la presión del agua con el aumento de velocidad, en el paso a través de la rejilla. Esto puede derivar en la obturación de la rejilla y/o el prefiltro.

Cuadro 7

ESPECIFICACIONES COMERCIALES DE GRAVAS PARA PERFORACIÓN		
Nº	DIÁMETRO (mm)	PESO ESPECÍFICO (gr/cm ³)
0	de 18 a 40	1,6
2	de 12 a 18	1,6
3	de 9 a 12	1,6
4	de 5 a 9	1,6
6	de 4 a 6	1,6
2/4 = 12 esp.	de 2 a 4	1,6
12	de 1,5 a 2	1,5
15	de 1 a 1,5	1,5
20	de 0,5 a 1	1,5
50	de 0,1 a 0,4	1,5

La mica, que tiene forma laminar, puede disponerse en forma transversal al flujo y obturar significativamente la sección de pasaje.

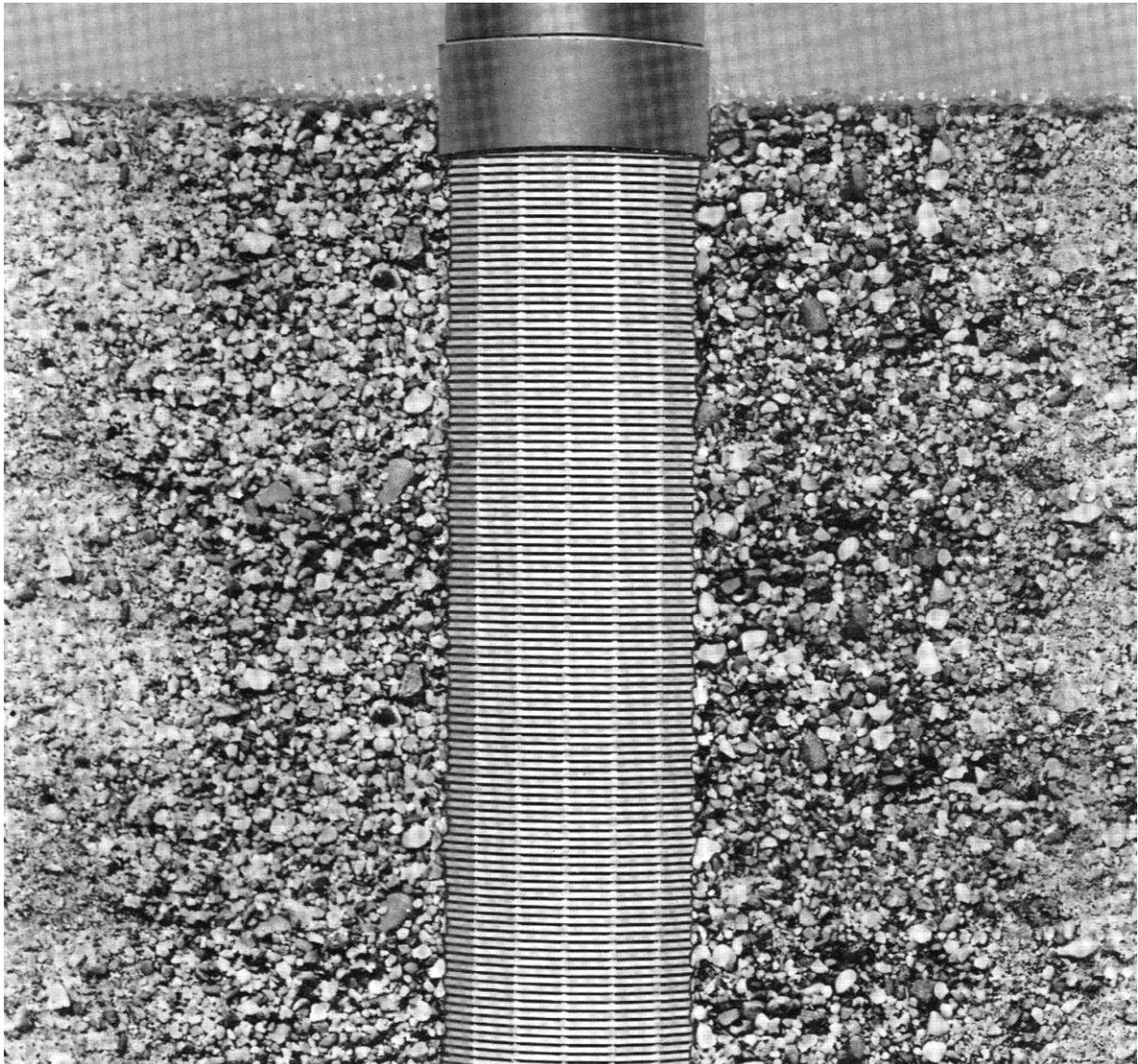
Los clastos silicios son muy resistentes a la disolución y por ende muy estables.

El hierro y la arcilla pueden obturar los huecos y disminuir la permeabilidad.

En caso de no ser necesario el engravado artificial, el pozo debe engravarse naturalmente para lo cual se elige una abertura del filtro equivalente al diámetro del 50% retenido en peso. Esto es, la mitad del material de formación será retenido por la rejilla y la otra mitad, podrá ingresar al pozo durante las tareas de desarrollo. Este material debe ser posteriormente extraído de la perforación.

La figura 36 muestra la disposición de los clastos en un pozo engravado naturalmente. En ella se aprecia que los tamaños mayores se ubican en la vecindad del filtro y que a medida que aumenta la distancia, disminuye el tamaño de grano.

Figura 36



Distribución de tamaños en la vecindad de un pozo engravado naturalmente.

6. LIMPIEZA Y DESARROLLO DEL POZO

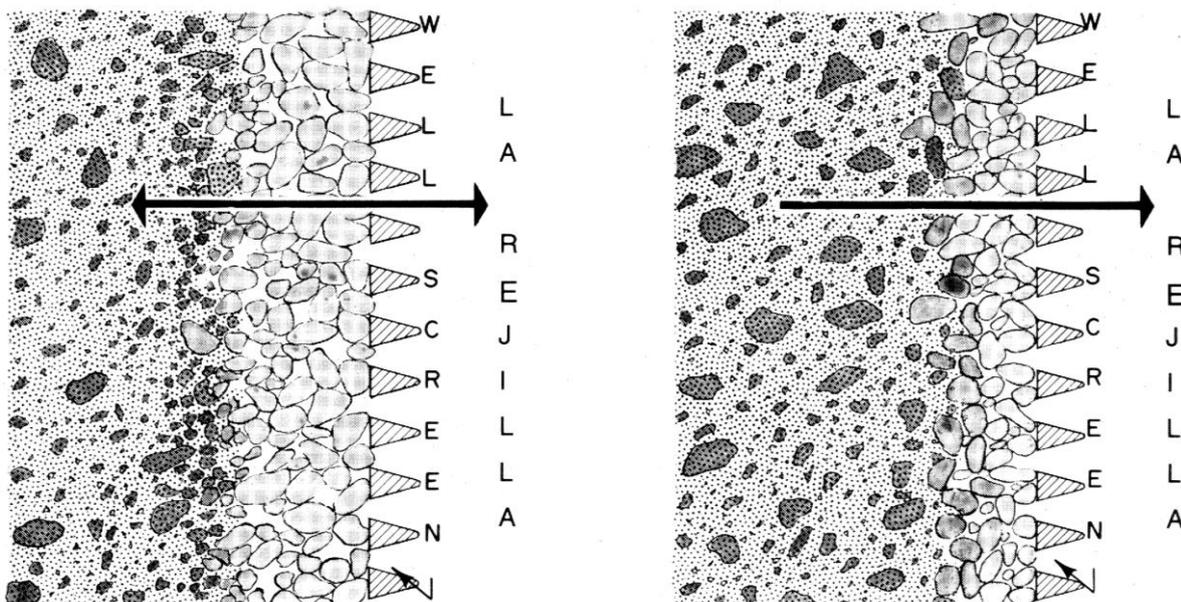
La limpieza y fundamentalmente el desarrollo, son prácticas esenciales para el correcto funcionamiento del pozo.

La **limpieza** consiste en extraer los materiales ingresados a la perforación durante su ejecución, como los finos incorporados a la inyección al atravesar estratos limosos y/o arcillosos, o aquellos agregados artificialmente como la bentonita.

Los finos pueden eliminarse mediante la circulación con agua limpia, luego del entubado y engravado, o también mediante bombeo, con equipos provisorios, que posteriormente serán reemplazados por la bomba definitiva. Los tamaños medianos (arena) suelen extraerse cuchareando.

El **desarrollo** consiste en extraer los granos finos (limo y arcilla) y los medianos (arena fina), emplazados en el prefiltro de grava y en la formación productiva vecina al mismo. Para ello es necesario generar un flujo de direcciones contrarias; o sea hacia fuera del filtro para facilitar la movilización de las partículas y luego hacia adentro, para que sean arrastradas al interior del pozo y puedan ser extraídas (figura 37).

Figura 37



Flujo hacia afuera y hacia adentro del filtro para lograr un correcto desarrollo del pozo.

La finalidad del desarrollo es incrementar la permeabilidad en la vecindad del filtro, para lograr que el pozo funcione con un elevado rendimiento. Los métodos más empleados para el desarrollo son:

- **Chorro de alta velocidad o jet**
- **Pistoneo**
- **Inyección de aire**
- **Bombeo**

- Cuchareo

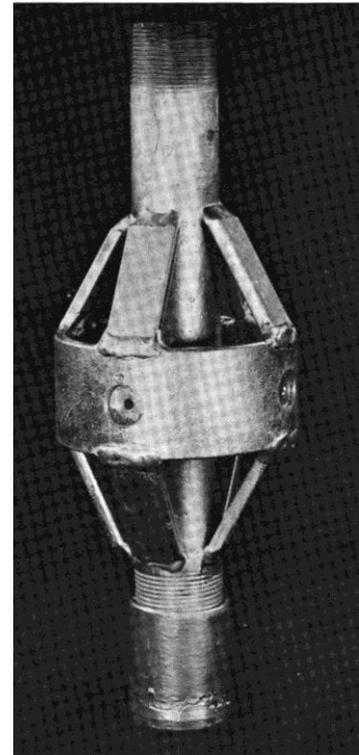
6.1. CHORRO DE ALTA VELOCIDAD O JET

Es uno de los métodos más eficientes para el desarrollo, pues concentra el flujo de agua en una superficie reducida, lo que permite la movilización del limo, arcilla y arena fina, en el prefiltro y la formación productiva, y el ingreso de los mismos a través de las rejillas ubicadas por debajo y por encima del sitio donde se aplica el chorro.

El dispositivo consta de un eyector de dos o más boquillas (figura 38), bomba y manguera para alta presión, sarta de tubería para la inyección y recipiente para abastecimiento del agua. El procedimiento consiste en eyectar agua limpia por las boquillas para que el chorro atraviese la rejilla a una velocidad de alrededor de 50 m/s; los orificios más empleados para las boquillas van de 5 a 13 mm. En la figura 39 se esquematiza el funcionamiento del eyector en un filtro de ranura continua y en otro con ranuras discontinuas. En este último caso, se aprecia la pérdida de efectividad del chorro debido a la escasa superficie filtrante.

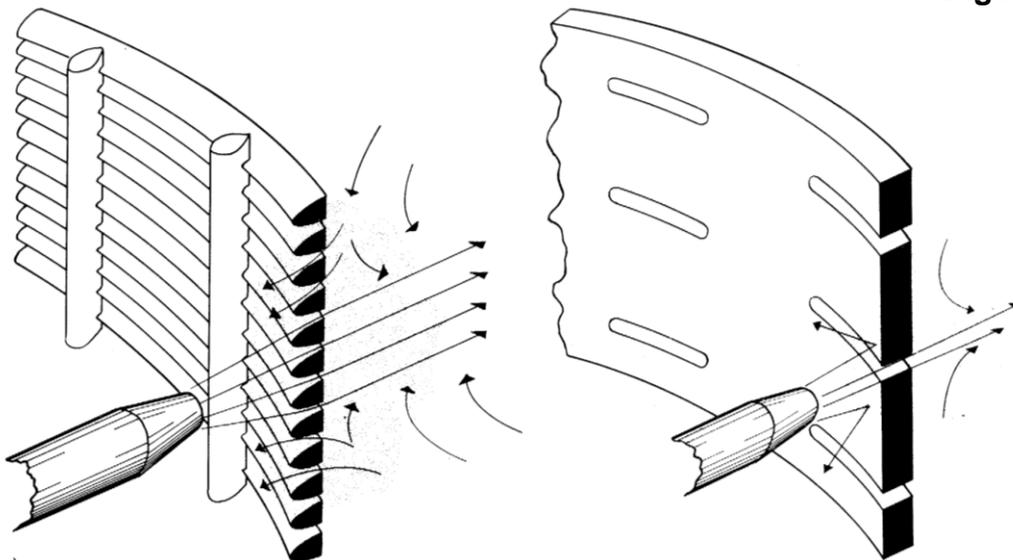
El eyector se hace girar con una manivela acoplada a la tubería de inyección y se levanta y baja

Figura 38



Eyector de 4 boquillas para el desarrollo con jet.

Figura 39



Pasaje del chorro a través de las rejillas. El filtro con ranuras discontinuas le quita efectividad al jet.

lentamente para lograr un efectivo barrido del filtro. Las tuberías de inyección más empleadas van de 1,5 a 3" y las presiones son del orden de 35 kg/cm². Para lograr una alta efectividad, las boquillas deben estar lo más cerca posible a la pared del filtro; en este sentido un distanciamiento de 1" es más que suficiente, pero debe operarse con mucho cuidado para no dañar el filtro, especialmente si es de ranura continua, por lo expuestas que están las nervaduras axiales.

Durante la aplicación del chorro, si el diámetro del entubamiento lo permite, es conveniente bombear con un equipo que extraiga aproximadamente el mismo caudal que se inyecta, para favorecer el ingreso y la extracción de los finos removidos por el jet. **Respecto a los caudales de inyección varían entre 3.500 l/h para un orificio de 5 mm y una velocidad de 36 m/s y 23.000 l/h para 13 mm y 57 m/s.**

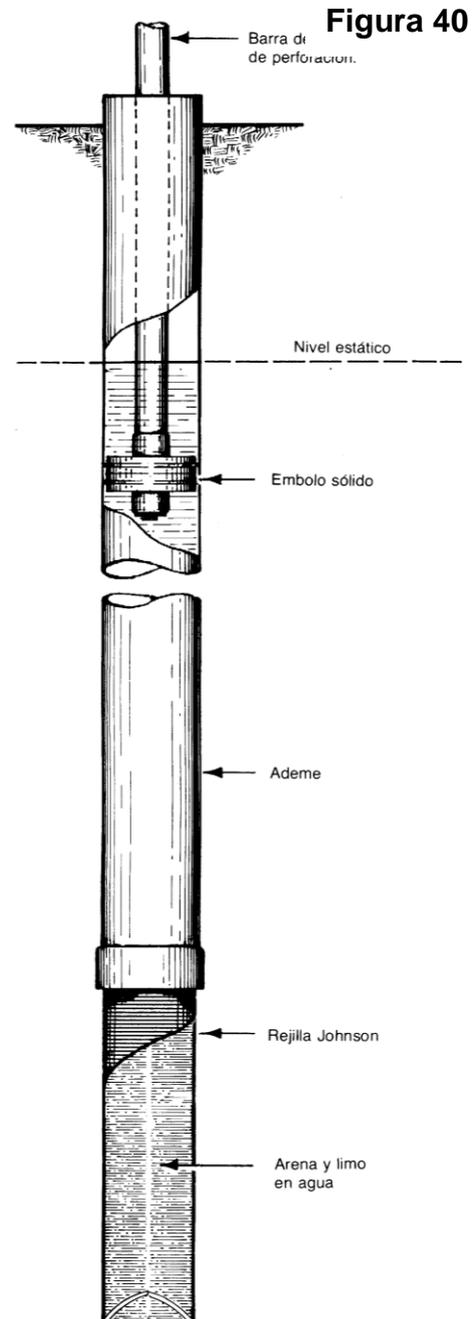
6.2. PISTONEO

Se basa en la acción de un émbolo acoplado a las barras de perforar, que se hace descender y ascender en el interior de la camisa. El movimiento descendente del pistón agita las partículas finas contenidas en el prefiltro y en la formación productiva vecina, y el recorrido ascendente, al succionar, las introduce en el pozo a través de las rejillas del filtro. Cuando se acumula una cantidad apreciable de arena fina en la parte inferior del filtro (1 m o más), debe extraerse para lo cual se emplea una cuchara.

Los émbolos pueden ser de dos tipos: ciego o con válvulas.

En la figura 40, se indica la posición de un émbolo ciego o sólido, del tipo esquematizado en la figura 41. El émbolo con válvulas (figura 42) produce una agitación más moderada, por que parte del flujo en la carrera descendente, se canaliza hacia arriba a través de la válvulas.

El pistoneo se emplea con frecuencia en los equipos de perforación a cable, debido a la ventaja que otorga la biela excéntrica, al permitir el ascenso y descenso continuado del émbolo.

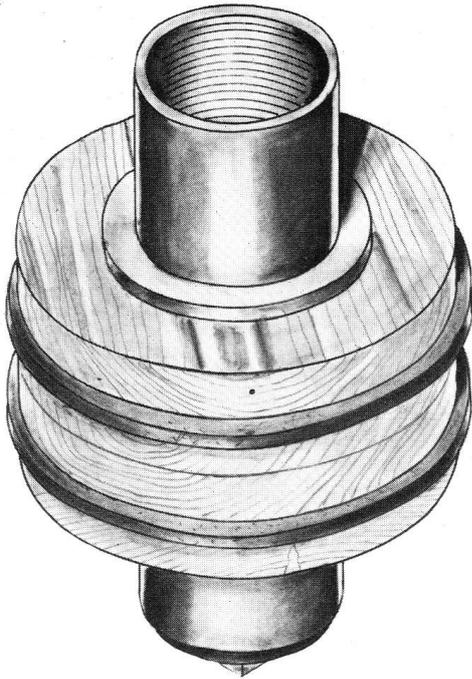


Émbolo en posición para el pistoneo.

Para aumentar el peso sobre el pistón, el cable se sujeta a las barras de perforar en cuyo extremo inferior se acopla el émbolo. En los equipos de perforación rotativos, el pistón se acciona mediante el tambor para cuchareo.

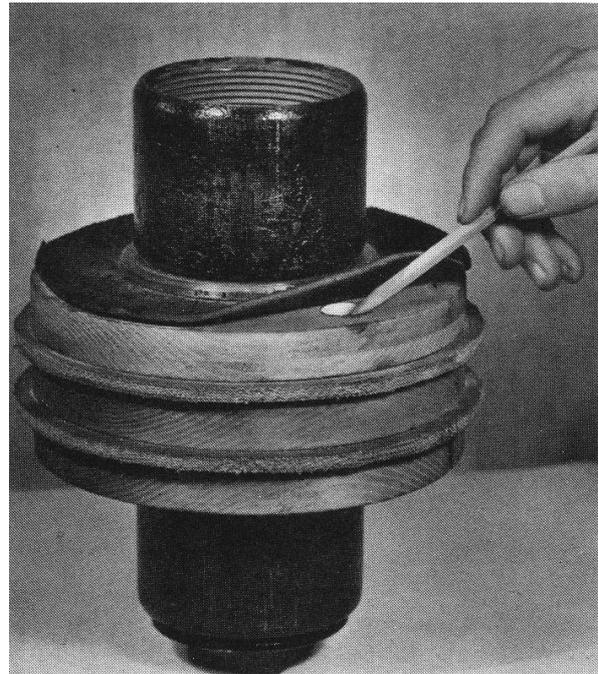
El pistoneo es uno de los métodos más sencillos y generalmente brinda muy buenos resultados en el desarrollo de pozos para agua.

Figura 41



Émbolo ciego

Figura 42



Émbolo con válvulas

6.3. INYECCIÓN DE AIRE

El empleo de aire comprimido es otro método eficaz para el desarrollo. El aire inyectado burbujea en el agua, la gasifica y, al perder densidad, asciende por dentro de la tubería hasta la superficie. Para lograr el efecto mencionado, se requiere un compresor que genere una presión de aire mayor que la de la columna de agua sobrepuesta. Por ejemplo, si el extremo inferior de la tubería de inyección de aire se ubica 40 m por debajo del nivel estático, el compresor debe erogar más de 4 kg/cm² para superar la presión de la columna de agua. La inyección de aire genera una intensa agitación que produce la movilización de los finos y permite su posterior ingreso al pozo.

Para evitar el derrame de agua por la boca del pozo y para mejorar la acción del aire comprimido, se emplea un conjunto integrado por una tubería de inyección y una cañería para bombeo o de educción (figura 43).

Para producir la agitación, se coloca la tubería de aire unos 50 cm por debajo de la de educción y se inyecta aire durante unos 5 minutos; luego se levanta la línea

de aire hasta que quede 50 cm o 1 m dentro de la cañería de educción; en esta posición, el aire inyectado actúa como una bomba y el agua vierte por la cañería de descarga (figura 43). Las maniobras de inyección se hacen a lo largo de todo el filtro y las de bombeo en la vecindad del fondo, para facilitar la extracción de los sólidos ingresados al pozo.

La capacidad de los compresores empleados para el desarrollo con aire, generalmente varía entre 6 y 12 kg/cm², dependiendo de la carga hidráulica a vencer.

En el cuadro 8 se indica el diámetro recomendado para la cañería de educción, en función del Ø la camisa y del Ø de la tubería de inyección. También se señalan los caudales aproximados para cada dupla de educción – inyección, aunque estos dependerán de la productividad del acuífero y del pozo y de la profundidad a que se ubique el nivel en bombeo o dinámico.

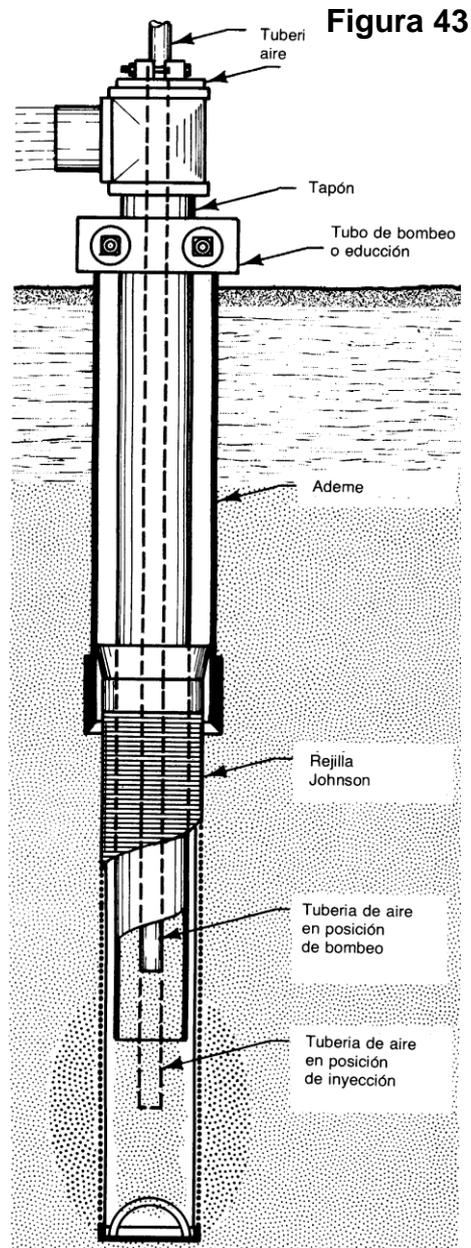
Para tener una idea del orden de magnitud de los caudales, se puede asumir una relación de 6 a 1 del aire, respecto al agua, o sea para obtener 1 m³ de agua, se deben inyectar 6 m³ de aire.

6.4. BOMBEO

El bombeo escalonado (arranques y paradas sucesivos), es otro de los métodos comúnmente empleados por los perforadores, aunque es menos eficaz que los mencionados previamente. Para que el proceso sea efectivo la bomba no debe tener válvula de retención o de pie, a fin de permitir que la columna de agua que llena la cañería de vertido durante el bombeo, pueda descargar libremente en el pozo cuando se detiene la extracción.

Durante el bombeo ingresan los sólidos y al parar se produce la agitación.

Para evitar el deterioro del equipo de bombeo definitivo, para el desarrollo se utiliza uno temporario, en general una bomba centrífuga con transmisión cardánica.



Equipo para inyección de aire, con la tubería de aire en posición de inyección y de bombeo.

Cuadro 8

Caudal de bombeo (litro/minuto)	Diámetro del ademe cm	Diámetro de la tubería de educación cm	Diámetro del tubo de aire cm
100 a 230	10,0	5,0	1,25
230 a 300	12,5	7,5	2,5
300 a 380	15,0	9,0	2,5
380 a 570	15,0	10,0	3,2
570 a 950	20,0	12,5	3,8
950 a 1500	20,0	15,0	5,0
1500 a 2650	25,0	20,0	6,3

Diámetros de tubería para inyección de aire.

En las etapas finales del desarrollo, si la bomba tiene suficiente capacidad, se la opera a un caudal mayor al previsto para la explotación (sobrebombeo). Si el pozo funciona correctamente en estas condiciones (no arrastra finos en el arranque), seguramente también lo hará cuando opere en explotación, a un caudal menor.

6.5. CUCHAREO

Se emplea con frecuencia en los pozos perforados por percusión a cable. Consiste en accionar una cuchara a la que se hace descender y ascender continuamente, mediante el tambor para cuchareo. La cuchara es hábil para cargar y extraer los sólidos acumulados en el fondo, pero poco efectiva para agitar. De los mencionados, es el método menos eficaz para lograr un buen desarrollo.

6.6. PRODUCTOS QUÍMICOS

Algunas sustancias químicas, como los polifosfatos de sodio, particularmente el hexametáfosfato de sodio, dispersan las partículas de arcilla incorporadas naturalmente o agregadas con la inyección (bentonita). Al romper su aglutinamiento, permiten su remoción del filtro, prefiltro y material de formación. Los polifosfatos pueden agregarse durante el desarrollo, cualquier sea el método empleado, preparándolos a razón de unos 6 kg por metro cúbico de agua.

En pozos perforados a rotación con circulación directa e inyección a base de bentonita, el hexametáfosfato de sodio puede incrementar significativamente sus rendimientos, llegando con frecuencia a duplicarlos.

6.7. CONCLUSIONES

- El desarrollo constituye una práctica imprescindible para lograr un pozo eficiente.
- El tiempo requerido para obtener un buen desarrollo suele ser similar y a veces mayor que el insumido por la perforación y su entubamiento.

- Se considera que un pozo está bien desarrollado, cuando luego de extraer una cantidad apreciable de sólidos (limo, arcilla y arena fina), al arrancar el bombeo, no hay arrastre de partículas en suspensión.
- Son pocos los perforadores que le otorgan al desarrollo la importancia que realmente tiene.
- El mejoramiento en el rendimiento de un pozo bien desarrollado respecto a otro que no lo está, se traduce en una disminución del costo de bombeo que, al cabo de su vida útil, paga con creces el costo insumido por el desarrollo.

6.8. CLORACIÓN

El agregado de cloro como hipoclorito de sodio o de calcio, es una práctica corriente para la desinfección de un pozo.

El empleo de las herramientas de perforación (trépano, barras), la circulación de agua en contacto con el suelo, a través de canaletas y piletas de inyección, y la instalación de cañerías, grava y cemento, permiten el ingreso de las bacterias existentes en el ambiente, particularmente en el suelo, al interior del pozo y del acuífero. Por ello, la tarea final para completar adecuadamente una perforación, consiste en su desinfección.

El hipoclorito de calcio es una sustancia granular blanca que posee alrededor del 70% de cloro libre, que debe disolverse en agua limpia antes de inyectarla. Para la desinfección normalmente se utilizan soluciones con concentraciones de 50 a 200 ppm de cloro. En el cuadro 9 se indica la cantidad de hipoclorito de calcio a disolver en 1 m³ de agua, para lograr la concentración de cloro libre deseada. Como se aprecia, para conseguir que en 1 m³ de agua se tengan 200 ppm de cloro, es necesario disolver 300 gramos de hipoclorito de calcio.

El hipoclorito de sodio sólo se dispone en solución porque es muy inestable, la máxima concentración comercial es del orden del 20% de cloro disponible, mientras que las lavandinas para uso doméstico sólo tienen un 5%. En el cuadro 10 se indican los volúmenes de hipoclorito de sodio necesarios para preparar una solución de 1 m³ con diferentes concentraciones de cloro.

Cuadro 9

Concentración de cloro ppm	Cloro gramos	Hipoclorito de calcio seco gramos
50	50	70
100	100	140
150	150	200
200	200	300
300	250	400
400	350	500

Productos necesarios para preparar 1 m³ de solución clorada.

Para lograr una buena desinfección se requiere una solución de alrededor de 100 ppm de cloro disponible en el pozo, por lo que, para efectuar la preparación, debe considerarse la dilución que producirá el volumen de agua contenida en el mismo. Ejemplo: si la perforación es de 8" el volumen almacenado será de 32 litros por metro y si la columna de agua fuese de 30 m, la contenida en el pozo rondaría los 1.000 litros. Por lo tanto para lograr una solución de 100 ppm en el pozo, deben agregarse 4 litros de lavandina al 5%, en 1 m³ de agua.

Luego de verter la solución de hipoclorito en el pozo, para lo cual es recomendable el empleo de una tubería de inyección, debe agitársela para lograr un buen mezclado. La agitación puede realizarse mediante cualquiera de las técnicas mencionadas en el capítulo desarrollo; si se emplea una bomba sin válvula de pie, la extracción debe interrumpirse ni bien el agua mane por la cañería de descarga, para evitar que la entrada desde el acuífero diluya la solución. Después de lograr un buen mezclado, que implica unos 10 arranques y paradas sucesivas, se deja reposar al menos durante 12 horas. Posteriormente, previo al muestreo, se bombea hasta que el agua no tenga olor a cloro, o si se dispone de un detector de cloro libre, la concentración sea inferior al 0,001%.

6.9. MUESTREO DE AGUA

Luego de eliminado el cloro, se toma una muestra en un frasco de vidrio esterilizado de 200 cm³, con boca y tapa esmeriladas, que se llena para que no contenga aire, se lo rotula, se lo coloca en una conservadora con hielo y, antes de las 24 horas, se lo lleva al laboratorio para su análisis bacteriológico. Es preferible tomar la muestra en un grifo de descarga donde pueda regularse el caudal, al que previamente hay que quemar con un hisopo embebido en alcohol, para eliminar la posible contaminación bacteriana. Si en la muestra se detecta la presencia de bacterias del tipo colí, hay que repetir la cloración, porque éstas son indicadoras de contaminación fecal.

El muestreo para análisis químicos, se realiza en botellas de plástico de 1 litro con doble tapa; también es conveniente completar su llenado para expulsar el aire. Luego de rotulada, la muestra se remite al laboratorio. Las determinaciones analíticas más frecuentes en muestras de agua subterránea son: conductividad eléctrica, pH, bicarbonatos, carbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos, salinidad total, dureza, sodio, calcio, magnesio, potasio, flúor y arsénico.

Cuando existen indicios de contaminación por actividad industrial o agrícola, es necesario establecer el tipo de los probables contaminantes. Ejemplo: si la

Cuadro 10

Concentración de cloro ppm	Litros de lavandina para las siguientes concentraciones		
	5%	7%	10%
50	1,0	0,71	0,5
100	2,0	1,43	1,0
150	3,0	2,14	1,5
200	4,0	2,86	2,0
300	6,0	4,28	3,0
400	8,0	5,72	4,0

Cantidad de lavandina necesaria para preparar 1 m³ de solución clorada.

perforación se encuentra en la vecindad de: una curtiembre hay que requerir la determinación de cromo; una procesadora láctea o faenadora de hacienda (nitratos y bacterias); una planta de acumuladores (plomo); un basural (nitratos, fenoles y bacterias); una zona de quintas (plaguicidas y fertilizantes); una refinería de petróleo (hidrocarburos). Estas determinaciones específicas requieren de recipientes, tratamiento y conservación especiales, por lo que el muestreo debe efectuarlo personal especializado.

7. ENSAYOS HIDRÁULICOS

Los ensayos hidráulicos o de bombeo se realizan para establecer las características hidráulicas de los acuíferos y de los pozos.

Se los puede clasificar de muchas maneras, pero en general, se los agrupa en ensayos a caudal constante o variable; con o sin pozo de observación.

Un ensayo de bombeo consiste en la extracción de un caudal constante o variable y en la medición periódica del nivel de agua, tanto en el pozo de bombeo, como en el o los pozos de observación, si se dispone de ellos.

Un ensayo a caudal constante, con pozo de observación, tiene por objeto establecer los caracteres hidráulicos del acuífero y de las unidades hidrogeológicas asociadas (acuitardos), aunque sus resultados también puede emplearse para determinar la eficiencia del pozo de bombeo.

En el ensayo a caudal variable no se requiere pozo de observación y su utilidad radica en que permite establecer el rendimiento a diferentes caudales, determinar el caudal crítico y elegir el caudal más apropiado para el funcionamiento definitivo del pozo.

Para lograr un buen resultado con un ensayo de bombeo se requiere de:

- un equipo de bombeo capaz de mantener un régimen constante en cada franja de caudal requerido.
- un medidor de caudal que permita apreciar posibles variaciones en el mismo.
- medidor/es de nivel de agua para registrar las variaciones en el interior del o los pozos.
- una adecuada frecuencia de tiempos para efectuar las mediciones de niveles hidráulicos.

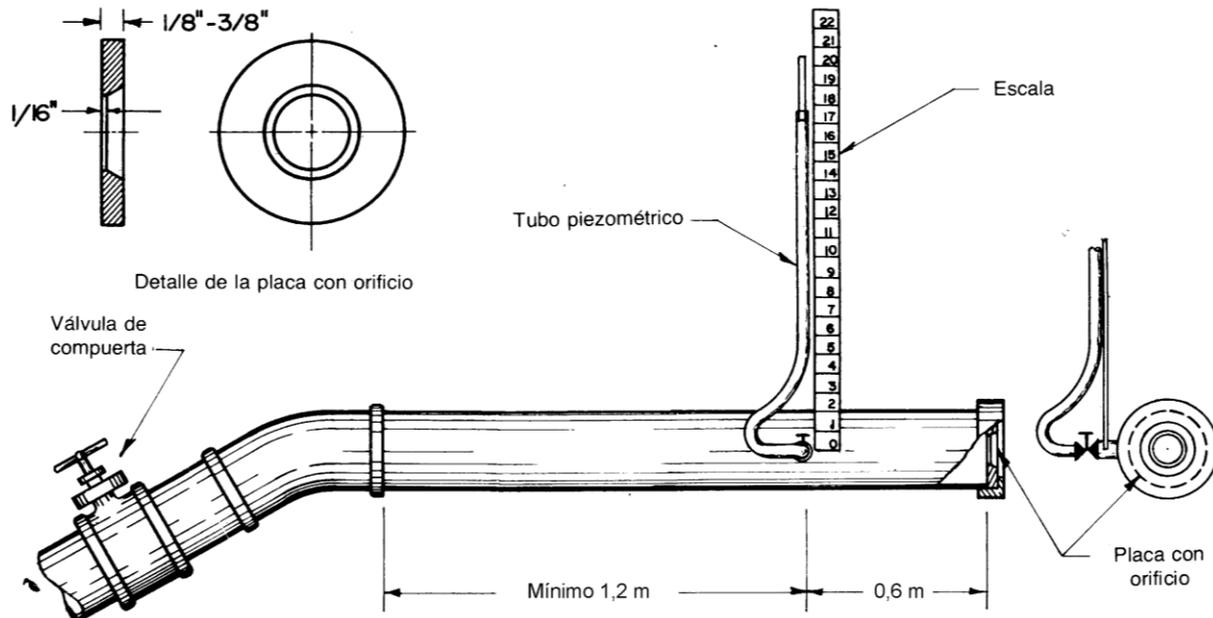
7.1. CAUDAL UNIFORME

El mantenimiento de un **caudal uniforme** durante un lapso determinado, que puede durar hasta la detención del bombeo, o hasta otra fase o escalón donde se aumente el mismo, constituye un requisito indispensable para lograr un buen ensayo. Para esto normalmente se emplean bombas con motor eléctrico, que además deben tener sus rotores o impulsores en buen estado. Los equipos de bombeo operados con motores o explosión, particularmente los de transmisión por correa, suelen manifestar variaciones importantes en el caudal, debido a cambios en el régimen del motor o a la mala adherencia de la correa.

7.2. CAUDALÍMETRO

A efectos de detectar posibles variaciones en el caudal, es necesario contar con un registrador que permita apreciarlas rápidamente. Para esto uno de los instrumentos más utilizados es el **caño con placa de orificio circular y tubo piezométrico** (figura 44).

Figura 44



Caudalímetro con placa de orificio circular y tubo piezométrico.

Dicho caudalímetro está compuesto por un caño de descarga, en cuyo extremo se coloca una placa con orificio circular de menor diámetro, a fin de que la presión generada por el pasaje del agua a través del mismo, pueda medirse en un tubo piezométrico situado a 60 cm de la placa orificio. En la figura 44 se esquematiza el dispositivo, donde también se aprecia que la entrada del tubo piezométrico al caño de descarga, debe estar al menos a 1,20 m de distancia de algún codo, llave exclusiva o brida, para evitar turbulencias. Otro requisito es que el agujero de la placa debe ser perfectamente circular, con su borde liso, biselado a torno, o sea sin irregularidades.

En la figura 45, se representa la curva para obtener el factor de descarga **K**, que aplicado a la ecuación siguiente permite determinar el **caudal de descarga**.

$$Q = 4,43 \cdot K \cdot A \sqrt{h}$$

Q: caudal (m³/seg) **K:** factor de descarga **A:** área del orificio (m²) **h:** altura piezométrica (m)

Figura 45

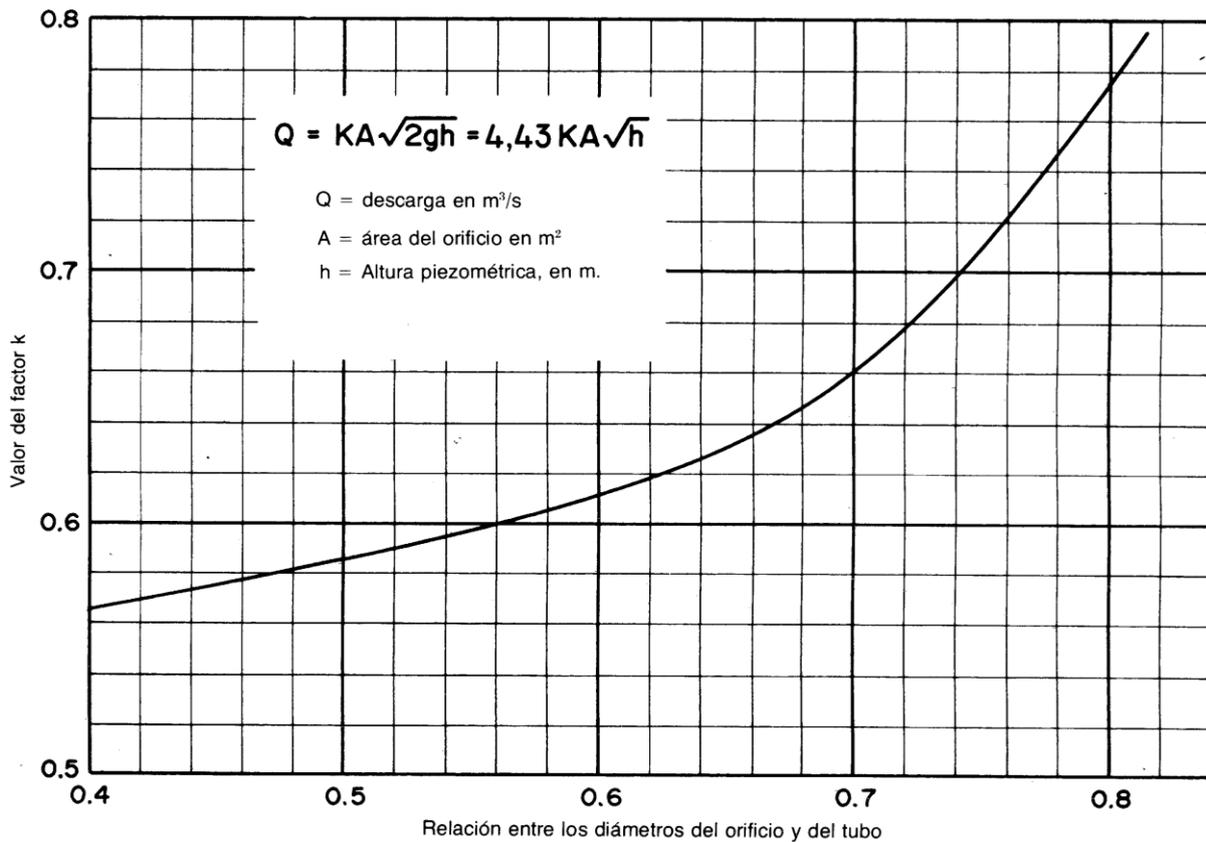


Gráfico para obtener el factor de descarga, en función de la relación de diámetros entre el orificio circular y el caño de descarga.

Para que el caudalímetro funcione correctamente, **el caño de descarga debe estar perfectamente horizontal**. La altura h del agua en el tubo piezométrico se puede medir con una regla graduada en cm, adosada al caño de descarga. Como se aprecia, el cero de la escala coincide con el centro del orificio que comunica el tubo piezométrico con la cañería de descarga.

Ejemplo: si la cañería de descarga es de 3" (75 mm) y el orificio de la placa de 2" (50 mm) la relación de diámetros será 0,67 y el valor de K 0,64. Si la altura en el tubo piezométrico fuese 48 cm, el caudal sería de 3,8 litros por segundo o 13,7 m³/h.

Las variaciones de caudal se visualizan fácilmente en el tubo piezométrico por cambios en la altura del agua; un aumento en el caudal se traduce en un ascenso de la columna de agua dentro del tubo y a la inversa, el descenso del nivel de agua, indica una disminución del caudal.

Otra forma de medir el caudal de un pozo en bombeo, es volcar la descarga en un recipiente de volumen conocido y tomar el tiempo que tarda en llenarse. Para esto, se utilizan frecuentemente los tambores comúnmente conocidos como de 200 litros, aunque es conveniente registrar el volumen antes de emplearlos, pues suelen tener 215 o 220 litros de capacidad. La medición con este procedimiento es menos precisa que con el caudalímetro de orificio circular, no se pueden apreciar las

variaciones de caudal hasta no realizar los registros y se hace muy complicado, medir por encima de 30 m³/h.

7.3. MEDICIONES DE NIVEL

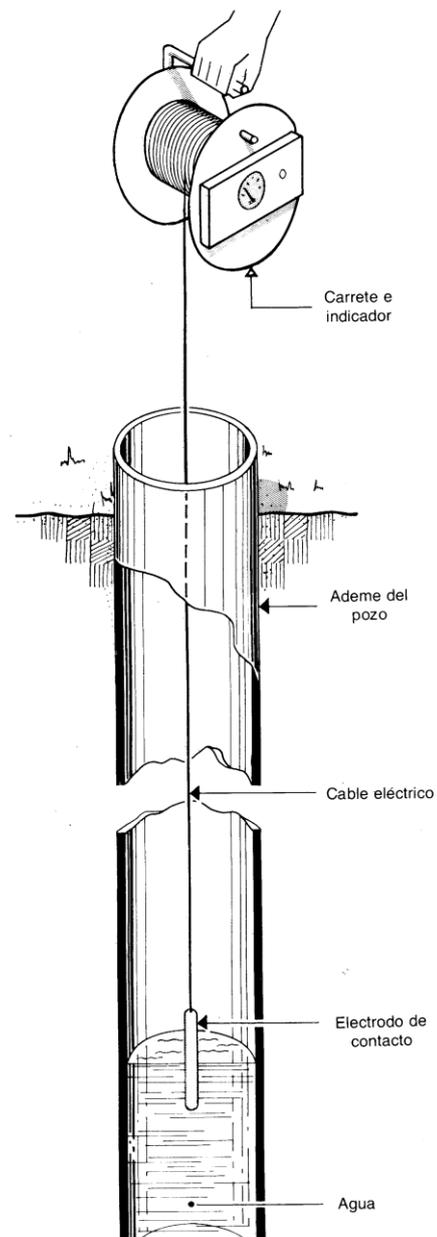
Para registrar las variaciones del nivel hidráulico en el pozo de bombeo, o en el o los de observación, generalmente se emplea una sonda piezométrica construida con 2 cables aislados entre sí; el cable puede ser el denominado de zócalo o el plano, utilizado para las antenas de TV. En la vecindad del extremo inferior del cable, se agrega un peso para tensarlo; el extremo superior que es el queda en la superficie, se conecta a un miliamperímetro o téster a efectos de detectar la posición del nivel de agua, al cerrarse el circuito cuando los extremos de los 2 conductores se sumergen. El cable puede rotularse cada 1 metro con un marcador indeleble y con otro color cada 5 o 10 m. El intervalo entre marcas puede medirse con una regla graduada, también se suele adosar al cable una cinta métrica. En la figura 46 se esquematiza una sonda piezométrica eléctrica, con el electrodo en contacto con el agua.

Para la correcta interpretación de un ensayo de bombeo, es suficiente alcanzar una precisión de 1 cm en las mediciones del nivel de agua; esto se logra fácilmente en los pozos de observación, pero se complica en el pozo de bombeo, particularmente en los registros iniciales del ensayo, que deben realizarse en lapsos cortos. Además, el flujo turbulento y/o variaciones en el régimen de la bomba, suelen producir bruscas variaciones del nivel hidráulico en el pozo de bombeo.

7.4. FRECUENCIA DE LOS REGISTROS

Existen diferentes criterios para elegir la frecuencia más apropiada a fin de efectuar las mediciones de nivel hidráulico. Sin embargo, todos coinciden en que durante los tiempos iniciales del bombeo, las mediciones deben ser más apretadas en el tiempo y deben espaciarse a medida que progresa el ensayo. Esto deriva de la forma en que evoluciona el cono de depresión generado

Figura 46



Sonda piezométrica eléctrica, con el electrodo en contacto con el agua.

por el bombeo, con una expansión relativamente rápida durante los tiempos iniciales de la extracción y una atenuación progresiva en su dinámica a medida que crece el tiempo.

Una frecuencia que ha brindado buenos resultados en los ensayos realizados en los acuíferos Pampeano y Puelche es la siguiente (cuadro 11):

CUADRO 11

FRECUENCIA PARA LAS MEDICIONES DEL NIVEL HIDRÁULICO

minuto													
0	1	2	3	4	5	7	10	15	20	25	30	40	60
90	120	150	180	240	300	360	420	500	600	700	800	1.000	1.200
1.400	1.500	1.700	2.000	2.300	2.600	3.000							

7.5. EFICIENCIA DEL POZO

Es la relación entre el caudal específico del pozo real, respecto de otro ideal o virtual.

El caudal específico es la relación entre el caudal y la depresión, para un determinado tiempo de bombeo.

En el **pozo real** a la resistencia virtual que opone el acuífero al paso del agua, se le agregan las pérdidas de carga producidas por el flujo no laminar en la vecindad del filtro, al atravesar las rejillas y, dentro del pozo, y de la cañería de bombeo. El **pozo ideal** sólo está afectado por las pérdidas producidas por la fricción del agua al pasar por los poros del acuífero.

Las pérdidas de carga se manifiestan como descenso o depresión del nivel hidráulico y de lo expuesto se desprende que, para el mismo caudal, la depresión en el pozo real será mayor que en el ideal o virtual; por lo tanto el caudal específico del real será menor que el del pozo virtual.

El caudal específico del pozo real (**Q_{er}**) se puede determinar fácilmente, pues es la relación entre caudal (**Q**) y depresión (**s**) y generalmente se expresa en m³/h.m:

$$Q_{er} = Q/sr$$

Para establecer el caudal específico del pozo ideal, es necesario conocer los parámetros hidráulicos del acuífero transmisividad (**T**) y almacenamiento (**S**); la mejor forma para cuantificarlos, es mediante la interpretación de un ensayo de bombeo a caudal constante, con pozo de observación.

La duración del ensayo depende de múltiples factores, pero en general es necesario un bombeo continuado de al menos 8 horas. Durante ese lapso y si es posible después de la detención del bombeo (recuperación), se efectúan medidas de nivel hidráulico en el de extracción y en él o los pozos de observación, de acuerdo a la frecuencia señalada en 7.4. Las depresiones se vuelcan en relación aritmética y los tiempos en relación logarítmica, quedando un gráfico como el indicado en la

figura 47. Esta metodología desarrollada por Cooper y Jacob (1946), conocida como de la línea recta, es fácil de aplicar y permite establecer la magnitud de la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento del acuífero. Pese a que existen una serie de requisitos teóricos que deben cumplir tanto el acuífero como los pozos, en la generalidad, los resultados son representativos de los parámetros hidráulicos transmisividad y almacenamiento de acuíferos como el Pampeano y el Puelche.

Ya se mencionó en 4.1. que la transmisividad (T) es el producto de la permeabilidad (K) por el espesor saturado (e) y que se expresa en m²/día.

El almacenamiento o coeficiente de almacenamiento es un factor adimensional que expresa una relación de volúmenes entre el agua que drena por gravedad y el volumen total de un acuífero libre, o el volumen que cede un prisma de base unitaria, cuando el nivel piezométrico desciende una unidad, en el caso de acuíferos bajo confinamiento.

Figura 47

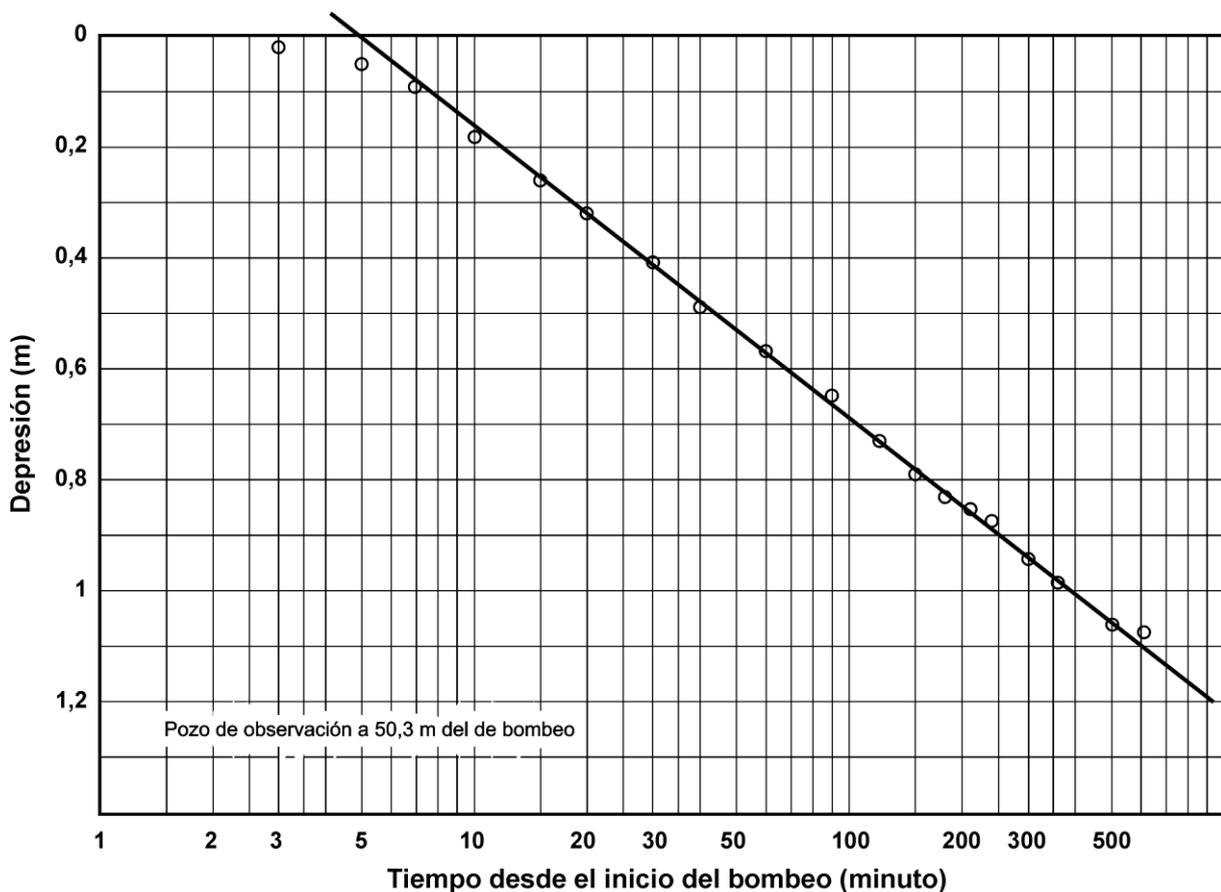


Gráfico semilogarítmico depresión-tiempo de un ensayo a caudal uniforme, para un pozo de observación situado a 50,3 m del pozo de bombeo.

Para calcular la transmisividad, se mide la depresión para un ciclo logarítmico (Δs). En la figura 47 Δs entre 1 y 100 minutos es 0,52 m. La ecuación que permite el cálculo es:

$$T = 0,183 \cdot Q/\Delta s$$

Si el ensayo se realizó a un caudal de 50 m³/h:

$$T = 0,183 \cdot 50 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 24\text{h}/0,52$$

$$T = 422 \text{ m}^2/\text{día}$$

Para determinar el almacenamiento se prolonga la línea hasta intersectar la horizontal equivalente a la depresión 0 m (**to**). En el ejemplo to=5 minutos. La ecuación es:

$$S = 2,25 \cdot T \cdot t_0/r^2$$

$$S = 2,25 \cdot 422 \text{ m}^2/\text{d} \cdot 5'/1440' \cdot (50,3 \text{ m})^2$$

$$S = 1,3 \cdot 10^{-3}$$

to: tiempo en día para depresión cero **r**: distancia entre el pozo de bombeo y el de observación (50,3 m).

El caudal específico del pozo ideal (**Qei**), surge de la combinación de las 2 ecuaciones anteriores:

$$Q_{ei} = Q/s_i = 4 \cdot \pi \cdot T / \log 2,25 \cdot T \cdot t/r^2 \cdot S$$

En el ejemplo, considerando el tiempo de bombeo real (600 minutos) y un filtro de 6" se tiene:

$$Q/s_i = 4 \cdot \pi \cdot T / \log 2,25 \cdot 422 \cdot 600/1440 \cdot (0,075)^2 \cdot 1,3 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{ei} = 686 \text{ m}^3/\text{d.m}$$

$$Q_{ei} = 28,6 \text{ m}^3/\text{h.m}$$

Por lo tanto el caudal específico del pozo ideal está en el orden de 29 m³/h por cada metro de depresión del nivel dinámico, al cabo de 600 minutos de extracción.

Si en el pozo real de bombeo al cabo del ensayo (600') para un caudal de 50 m³/h, se midió una depresión de 5,25 m, el caudal específico real (**Qer**) fue de 9,5 m³/h.m.

$$Q_{er} = 50 \text{ m}^3/\text{h.m}/5,25 \text{ m} = 9,5 \text{ m}^3/\text{h.m}$$

La eficiencia del pozo real será:

$$E_f (\%) = 100 \cdot Q_{er}/Q_{ei} = 33\%$$

Una eficiencia del 33% es muy baja para un pozo nuevo bien perforado y terminado. En general se considera que un pozo posee buen rendimiento cuando su eficiencia supera el 70%. El rendimiento es intermedio, si la eficiencia está entre el 50 y el 70% y es bajo, si la eficiencia es menor al 50%.

7.6. CAUDAL CRÍTICO

Es el caudal por encima del cual se produce una notoria disminución en el rendimiento del pozo, o sea un marcado descenso en el caudal específico. Por lo tanto, el caudal de operación de un pozo de explotación debe programarse de manera que sea menor que el **caudal crítico**.

La brusca disminución en el rendimiento, generalmente deriva de un incremento tal en la velocidad de entrada del agua, a través de las rejillas, que modifica el flujo de transicional a turbulento.

Para establecer la magnitud del caudal crítico (**Q_c**), lo más conveniente es efectuar un ensayo a caudal variable, con mediciones de nivel hidráulico en el mismo pozo de bombeo. Este ensayo, cuando se incrementa el caudal en cada fase sin detener el bombeo, se denomina **escalonado**.

Es conveniente programar el ensayo escalonado para 5 fases o escalones de diferentes caudales, aunque de no ser posible puede desarrollarse sólo para 3.

Para su realización se requiere de:

- una bomba con capacidad para superar con amplitud el caudal previsto para la explotación del pozo.
- una llave exclusiva para regular el caudal.
- un caudalímetro que puede ser del tipo placa con orificio circular.
- una sonda piezométrica eléctrica, graduada al 1 cm.

Las frecuencias para las mediciones en cada fase, pueden ser los mismos que los indicados en el cuadro 11.

Es conveniente iniciar el ensayo a un caudal equivalente a la mitad o menos del programado para el funcionamiento definitivo. Ejemplo: si el pozo está previsto para operar a 40 m³/h, la primera fase a escalón puede desarrollarse a 20 m³/h. Luego de alcanzar una cierta estabilidad del nivel dinámico, se incrementa el caudal a 0,75 del de operación; en este caso a 30 m³/h y se efectúan las mediciones de nivel como si el ensayo recién se iniciara (segunda fase). En la tercera fase se gradúa la descarga para que sea similar a la definitiva (40 m³/h) y se procede de la misma manera con las mediciones. En la cuarta fase se supera el caudal de operación en un 50% (60 m³/h) y en la quinta y última fase se lo duplica (80 m³/h).

Previo al cambio de caudal, para pasar de una fase a otra, es necesario verificar una tendencia al equilibrio en el nivel dinámico, que puede asumirse cuando

entre mediciones sucesivas realizadas cada 30 minutos, el descenso del nivel hidráulico no supera el 0,5% del producido durante la fase considerada.

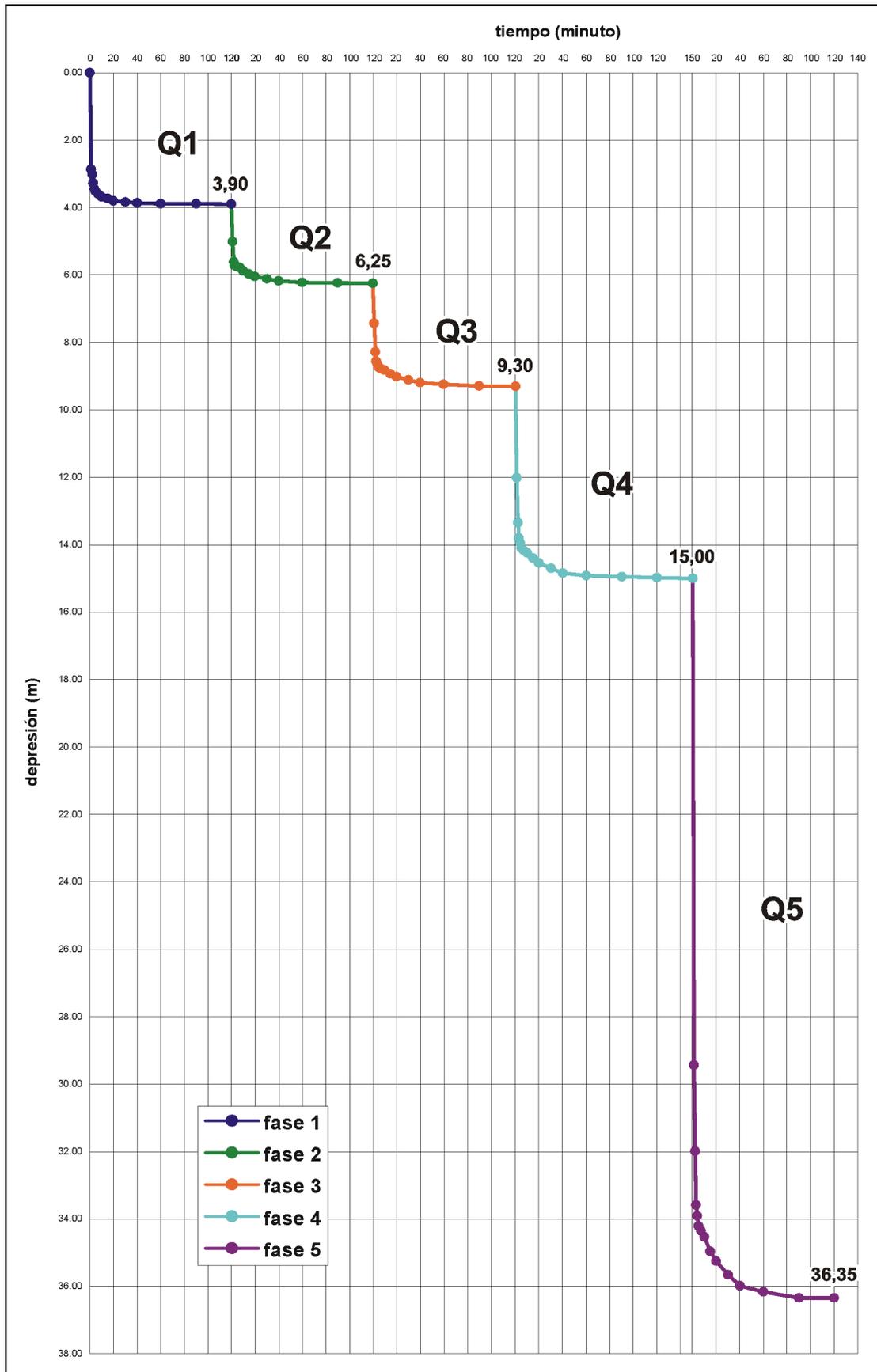
En la figura 48 se reproduce la curva de depresión, en función del tiempo, en relación aritmética, para la gama de caudales mencionados previamente, cuyos valores se indican en el cuadro 12.

Cuadro 12

ENSAYO DE BOMBEO ESCALONADO

FASE 1 Q1 = 20m3/h Qe1= 5,1 m3/h.m																
tiempo (min)	0	1	2	3	4	5	7	10	15	20	30	40	60	90	120	150
depresión (m)	0,00	2,87	3,02	3,27	3,45	3,53	3,60	3,68	3,73	3,80	3,84	3,86	3,88	3,89	3,90	-
FASE 2 Q2 = 30m3/h Qe2= 4,8 m3/h.m																
tiempo (min)	0	1	2	3	4	5	7	10	15	20	30	40	60	90	120	150
depresión (m)	3,90	5,01	5,61	5,72	5,74	5,76	5,78	5,87	5,97	6,04	6,12	6,18	6,22	6,24	6,25	-
FASE 3 Q3 = 40m3/h Qe3= 4,3 m3/h.m																
tiempo (min)	0	1	2	3	4	5	7	10	15	20	30	40	60	90	120	150
depresión (m)	6,25	7,44	8,28	8,56	8,65	8,74	8,79	8,83	8,93	9,02	9,11	9,20	9,24	9,29	9,30	-
FASE 4 Q4 = 60m3/h Qe4= 4,0 m3/h.m																
tiempo (min)	0	1	2	3	4	5	7	10	15	20	30	40	60	90	120	150
depresión (m)	9,30	12,01	13,35	13,80	13,95	14,10	14,17	14,25	14,40	14,55	14,70	14,85	14,92	14,95	14,98	15,00
FASE 5 Q5 = 80m3/h Qe5= 2,2 m3/h.m																
tiempo (min)	0	1	2	3	4	5	7	10	15	20	30	40	60	90	120	150
depresión (m)	15,00	29,44	31,99	33,59	33,91	34,21	34,35	34,53	34,97	35,26	35,66	35,99	36,17	36,34	36,35	-

Figura 48



Caudal – depresión – tiempo, para un ensayo de bombeo escalonado.

El nivel estático antes de iniciar el ensayo era 13,02 m y los dinámicos al finalizar: la fase 1 (16,92 m), la fase 2 (19,27 m), la fase 3 (22,32 m), la fase 4 (28,02 m) y al finalizar la fase 5 (49,37 m).

De los resultados del ensayo escalonado se desprende que el pozo funciona con un rendimiento parejo hasta un caudal de 60 m³/h, pues la disminución en el caudal específico entre 20 y 60 m³/h es de sólo un 22%. Entre 60 y 80 m³/h el rendimiento desciende bruscamente de 4 a 2,2 m³/h.m (45%). Por lo tanto, dado que el caudal crítico se ubica en esta franja, no es conveniente superar los 60 m³/h durante la explotación.

El ensayo a caudales mayores al programado, también constituye una práctica adecuada para verificar el funcionamiento del pozo en lo referente al arrastre de partículas sólidas (arena, limo o arcilla), porque si operando a un caudal superior al programado no hay evidencias de sólidos en suspensión, se puede inferir con fundamento que tampoco habrá arrastre durante la explotación.

El arrastre se manifiesta con mayor intensidad en los primeros tiempos posteriores al arranque, debido al brusco cambio en la velocidad de flujo. En condiciones de flujo natural, sin incidencia del bombeo, la velocidad en el Acuífero Puelche es del orden de 20 cm por día, valor que se incrementa a 3 cm por segundo al ingresar el agua al filtro, por lo tanto se pasa de 0,2 a 2.600 m/día en menos de 1 minuto. Este incremento en la dinámica, es el responsable del arrastre de sólidos y muchas veces de la obturación del prefiltro o del filtro. Por ello es conveniente regular el caudal luego del arranque, con una llave exclusiva, de manera de comenzar con descargas bajas e ir aumentándolas paulatinamente, hasta alcanzar el régimen definitivo al cabo de 5 o 10 minutos de extracción.

7.7. ELECCIÓN DEL EQUIPO DE BOMBEO

La elección del equipo de bombeo depende de:

- El tipo de pozo (exploración, en desarrollo, explotación).
- El caudal requerido.
- La profundidad del agua, tanto en reposo como durante el bombeo.
- La altura y/o distancia para elevar y/o llevar el agua.
- El funcionamiento del pozo (con o sin arrastre de sólidos en suspensión).
- La disponibilidad de energía (corriente eléctrica, combustibles líquidos, u otros).

En el punto 4.1. **equipos de bombeo**, se hizo referencia a los diferentes tipos de bombas, en función de sus principios de funcionamiento. Así, se mencionó a las bombas:

- **Centrífugas aspirantes o de vacío**, que operan fuera del agua y que pueden extraerla, generando una presión negativa inferior a la atmosférica.
- **A émbolo o pistón**, basadas en la acción de un émbolo dentro de un cilindro, que al elevarse impulsa el agua hasta la superficie.

- **Centrífugas impulsoras o sumergidas**, que tienen los impulsores o tazones dentro del agua y que se clasifican en **bombas de eje y con motor sumergido**.

Las últimas son las de uso corriente en perforaciones con caudales mayores a 10 m³/h, por lo que seguidamente se hará referencia a las mismas.

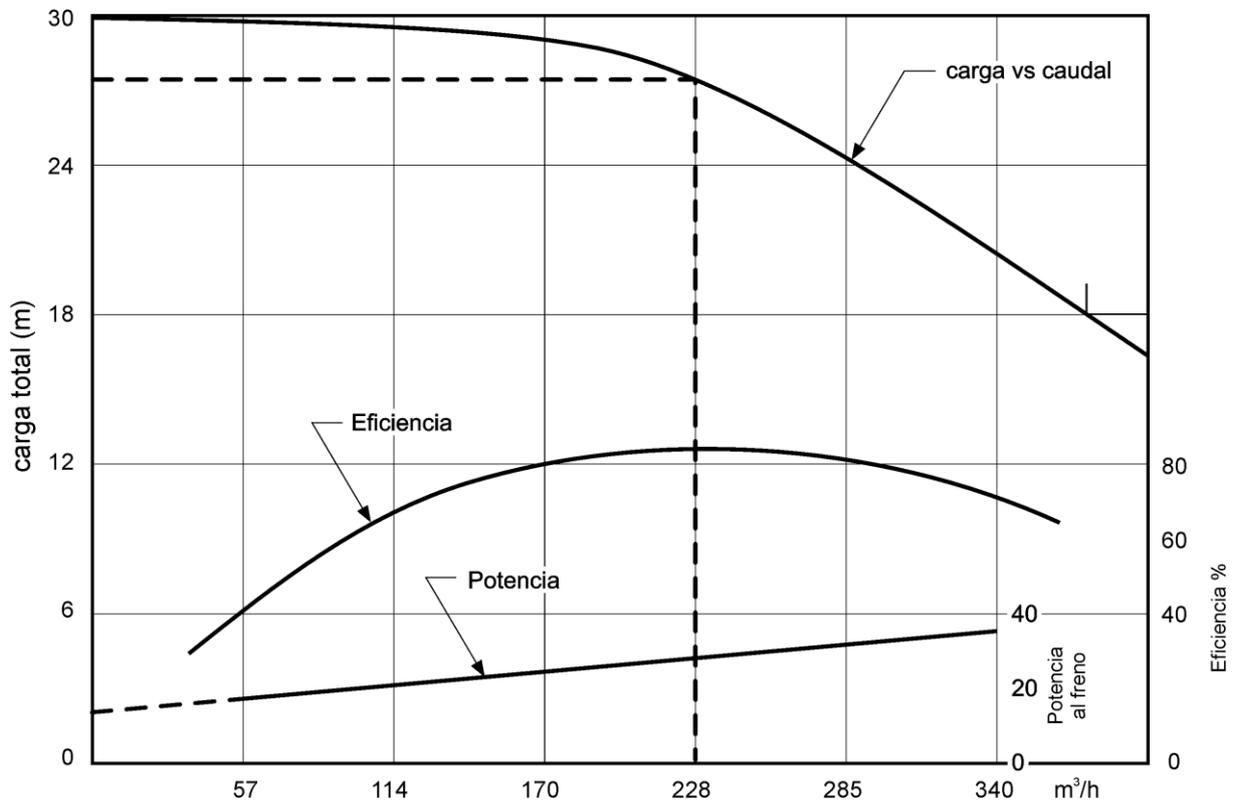
- En los pozos de exploración y/o en desarrollo, es conveniente usar equipos de bombeo que no sufran un fuerte deterioro por la presencia de sólidos en el agua. En este sentido las bombas más apropiadas son las de transmisión por eje o sistema cardánico, pues las de motor sumergido se deterioran rápidamente por la pérdida de aislación del motor. La casa Fraile de La Plata, desarrolló una bomba con transmisión por eje, en la que el agua circula por una cañería aislada del sistema de transmisión; con ello se evita el desgaste de los bujes y del eje. El mayor inconveniente de estos equipos es que requieren de un diámetro de entubamiento más grande que los usuales para las bombas de transmisión por eje. En los pozos de explotación que funcionan correctamente (sin arrastrar sólidos), y si se dispone de corriente eléctrica apropiada (trifásica para más de 20 m³/h), las bombas de mayor rendimiento son las que tienen el motor sumergido. En este tipo de bomba, las pérdidas por fricción son mucho menores que las de transmisión por eje.
- Respecto al caudal, las bombas impulsoras, particularmente las de motor sumergido, con una potencia adecuada pueden brindar hasta 500 m³/h si el acuífero está condiciones de erogarlos. Dentro de la Provincia de Buenos Aires es prácticamente imposible lograr caudales de tal magnitud, pero se alcanzan en el Acuífero Ituzaingó que es equivalente al Puelche, en las provincias de Corrientes y Entre Ríos, y también en los valles intermontanos del noroeste (Valle de Catamarca, Valle de Chilecito, Valle de Lerma, Valles Calchaquíes), o en los piedemontes de la región cuyana.
- La altura de elevación, es otro de los factores que inciden primariamente en la obtención de un determinado caudal. En el cuadro 5 se aprecia la disminución del caudal en función de la altura de elevación. Para una bomba que entre en una camisa de 10", el caudal máximo que a 30 m es de 370 m³/h, se reduce a 324 m³/h para una carga de 50 m; o sea la disminución es del orden del 13%.
- Ya se hizo mención a las ventajas de las bombas de transmisión por eje en los pozos con arrastre de sólidos en suspensión.
- En relación a la disponibilidad de energía, las bombas con motor sumergido sólo pueden operar donde se dispone de corriente eléctrica, o se la puede producir con un generador. En los sitios donde no hay corriente eléctrica es más frecuente el empleo de bombas con transmisión por eje, impulsadas por motores a explosión fijos, o mediante el uso de las

tomas de fuerza de los tractores. En estos casos la impulsión puede realizarse utilizando correas o cardanes.

En la figura 49, se representan las curvas de rendimiento de una bomba de impulsión, con un solo rotor, a 1.700 revoluciones por minuto. De la misma se desprende que la bomba puede producir 228 m³/h, contra una columna de agua de 28 m y con una eficiencia del 82% (línea punteada).

Respecto a la relación caudal – carga manométrica, para una misma velocidad de rotación, el primero es función del diámetro de los impulsores y la capacidad de elevación, de la cantidad de los mismos.

Figura 49



Curvas características de funcionamiento de una bomba de un solo impulsor, a 1.700 revoluciones por minuto.

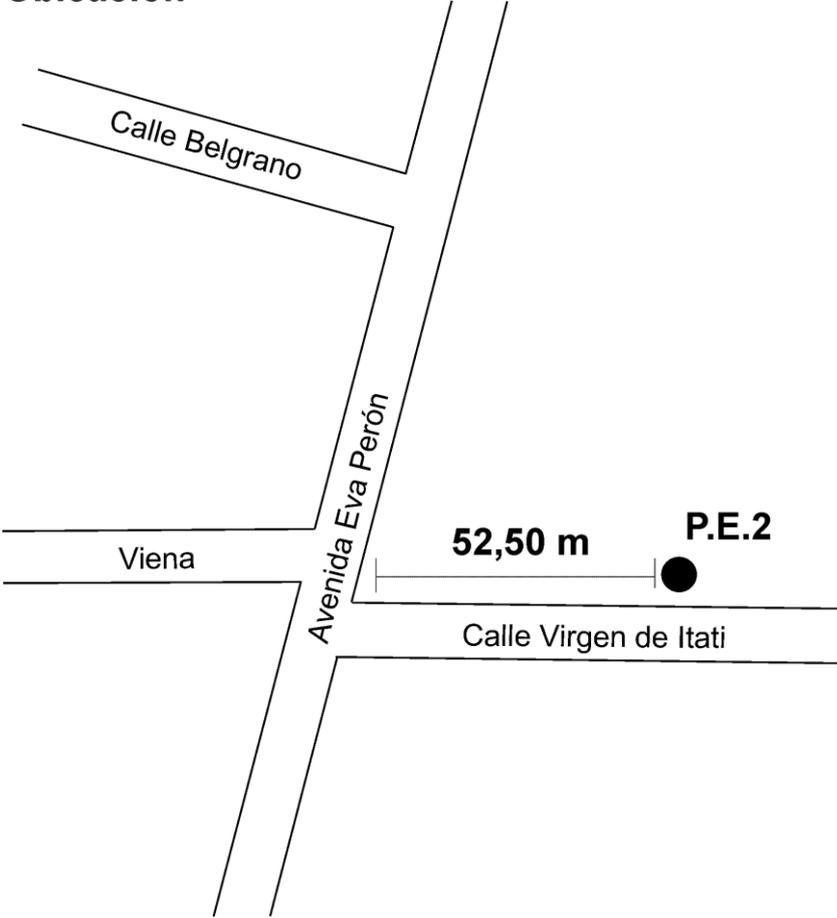
8. INFORME TÉCNICO FINAL

Este informe puede desarrollarse de varias maneras pero la más común y sencilla para visualizar e interpretar, es sintetizar los trabajos y resultados obtenidos, en un plano donde generalmente se indica:

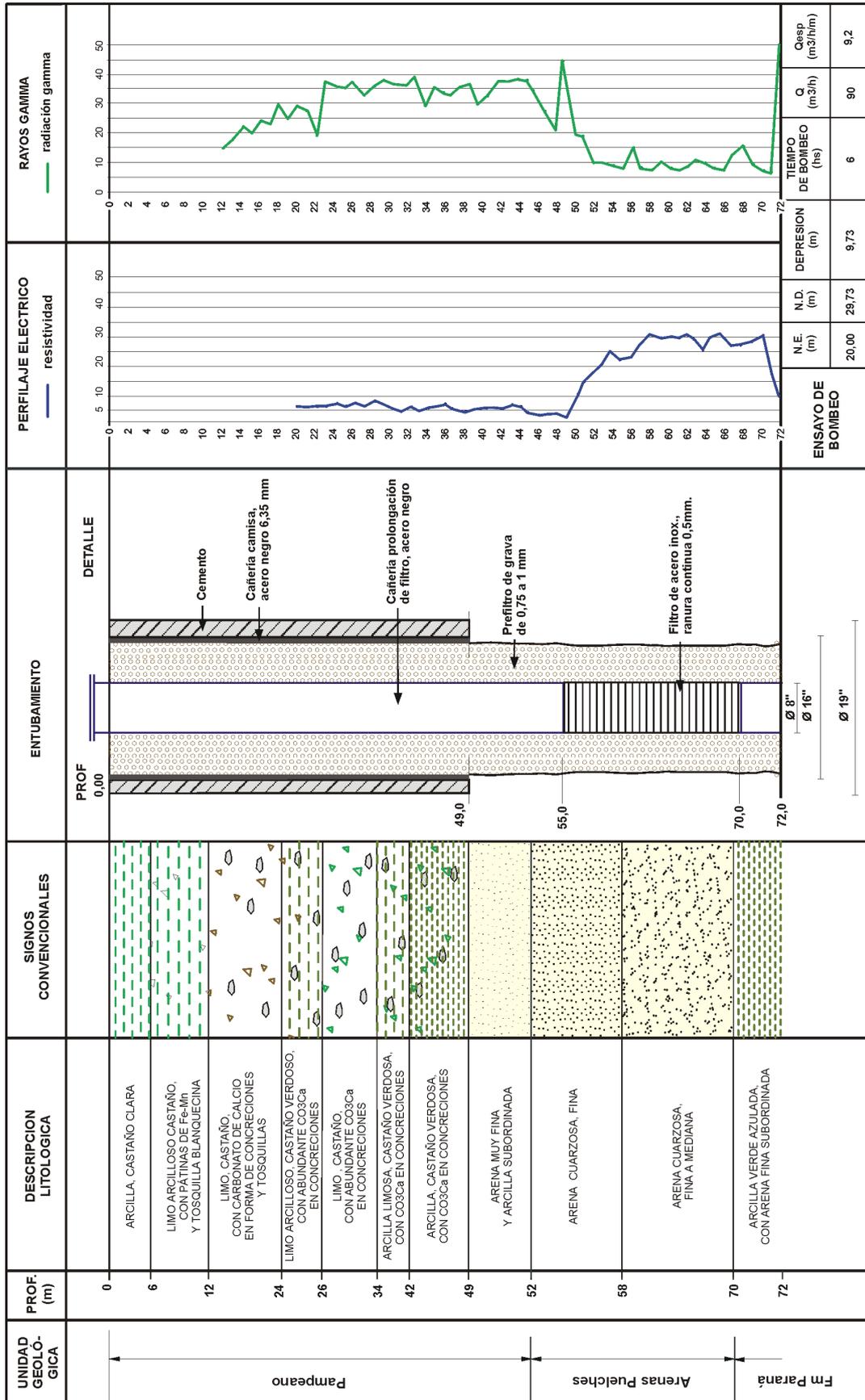
- ◆ ubicación y propietario.
- ◆ perfiles de avance, litológico y de entubamiento.
- ◆ perfilaje eléctrico y radiactivo.
- ◆ ensayos hidráulicos.
- ◆ composición química y bacteriológica del agua.

En el cuadro 13 se ejemplifica la síntesis del informe técnico final de un pozo de explotación, perforado para ABSA en Florencio Varela. Pese a que en el mismo faltan algunos perfiles y/o datos que se consideran trascendentes (análisis químicos y bacteriológicos, perfil de avance, curvas de ensayo), posee otros que también resultan importantes para la interpretación. En este sentido, existe buena correspondencia entre el crecimiento de la resistividad, a partir de 50 m de profundidad y la aparición de las Arenas Puelches. También, por debajo de 49 m, se observa una fuerte disminución en la radiación gamma, mientras que un incremento sostenido de la misma se aprecia entre 42 y 45 m, en correspondencia con la arcilla castaño verdosa, que actúa como techo del Acuífero Puelche y que en el perfil litológico se señala de 42 a 49 m.

Respecto al ensayo de bombeo sólo se brindan los valores de nivel estático, caudal y nivel dinámico, y los resultados numéricos de depresión y caudal específico. Sin embargo, es conveniente el agregado de las curvas de depresión y de recuperación que permiten el cálculo de la transmisividad del acuífero en el mismo pozo de bombeo, y si se dispone de pozo de observación, además de la transmisividad, la determinación del coeficiente de almacenamiento.

Ubicación	
	
Perforación de Explotación N° 2	
Director de Obra: Gq. Guillermo Espinosa Viale	Empresa: ABSA
Dirección Técnica: Geólogos. J. R. Cantou J.M. Reynaldi	Proyecto y Dirección: 
Fecha: Febrero 2003	Localidad: Florencio Varela Prov Bs. As.

Síntesis del informe técnico final



AGRADECIMIENTOS

Al Profesor Oscar Salom, por promover la elaboración de este libro, al Diseñador Industrial Carlos Sánchez, por la diagramación de figuras, cuadros y su inserción en el texto, y al Lic. Geoq. Guillermo Espinosa Viale, por haber facilitado el plano para la síntesis del informe técnico final del pozo.

BIBLIOGRAFÍA

AHRENS T.P. 1956. Water well design criteria. Water Well Journ. Set - nov/57 y dic/58. Traducido por

AUGE M.P. 1976 como: Criterios para el diseño de perforaciones de agua. CFI. Buenos Aires.

AUGE M.P. CECI J.H. FILI M.F. y HERNÁNDEZ M.A. 1973. Transmisividades regionales del Subacuífero Puelche en la Provincia de Buenos Aires. VI Congreso Nacional del Agua. Actas (I): 469-485. Santiago del Estero.

AUGE M.P. 1978. Un método sencillo para determinar el coeficiente de filtración vertical de capas filtrantes. Revista La Ingeniería # 102: 95-101. La Plata.

AUGE M.P. 1980. Curso de actualización profesional para perforistas. Bol. CHA # 43: 1-39. INCYTH. Ezeiza.

AUGE M. P. 1982. Recarga y descarga del Acuífero Puelche en la Cuenca del Río Matanza. Provincia de Buenos Aires, República Argentina. IV Congreso Mundial de Recursos Hídricos. Buenos Aires.

AUGE M.P. 1991. Sobreexplotación del Acuífero Puelche en La Plata, Argentina. XXIII International Hydrogeology Congress. Actas: 411-415. Islas Canarias.

AUGE M.P. 2001. Hidrogeología de La Plata – Argentina. Revista Latinoamericana de Hidrogeología. Vol. 1 # 1: 27-40. ISSN 1676-0099. Curitiba, Brasil.

AUGE M.P. y CASTILLA A. 2002. Hidrogeología de la Ciudad de Buenos Aires. XV Congreso Geológico Argentino. Actas ISBN987-20190-5-3. (III): 477-483. Buenos Aires.

AUGE M.P. HERNÁNDEZ M.A. y HERNÁNDEZ L. 2002. Actualización del conocimiento del Acuífero semiconfinado Puelche en la Provincia de Buenos Aires - Argentina. XXXII International Hydrogeology Congress. Proceedings. ISBN 987-544-063-9: 624-633. Mar del Plata.

AUGE M. P. y SANTI M. 2003. Riego con agua subterránea en la región arrocerá de Entre Ríos – Argentina. Rev. Ingeniería Sanitaria y Ambiental. ISSN 0328-2937 # 71: 64-71. Buenos Aires.

COOPER H.H. y JACOB C.E. 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. Am.Geophys. Union Trans. V 27: 526-534. Washington.

HERNANDEZ M.A. AUGÉ M.P. CECI J.H. y FILI M.F. 1975. Geohidrología de los acuíferos profundos de la Provincia de Buenos Aires. VI Congreso Geológico Argentino. Actas (II): 470-500. Buenos Aires.

JOHNSON E.E. 1975. El Agua Subterránea y los Pozos. Johnson Division UOP Inc. 1: 513. Saint Paul, Minnesota.

ROTOR PUMP 1995. Tablas de rendimiento para electrobombas sumergibles. Buenos Aires.

WALTON W.C. 1962. Selected analytical methods for well and aquifer evaluation. Illinois State Water Surv. Bull. 49. 1: 81. Urbana, Illinois.