

CLASES 4.26.T. y 4.27.T

## **EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS ROCAS INTRUSIVAS Y METAMÓRFICAS (I y II)**

1. **INTRODUCCIÓN**
2. **LA ALTERACIÓN SUPERFICIAL O METEORIZACIÓN**
3. **LA ALTERACIÓN PROFUNDA (FRACTURAS, DIACLASAS, FALLAS)**
4. **PARÁMETROS HIDRÁULICOS**
  - Porosidad y permeabilidad
5. **PERFORACIÓN DE CAPTACIONES**
6. **CALIDAD DEL AGUA**
7. **TIPOLOGÍA DE LAS CAPTACIONES**
8. **INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA**
  - Análisis de la red hidrográfica
  - Cartografía de detalle
  - Técnicas geofísicas
  - Inventario de pozos y sondeos
9. **DILEMA ENTRE LA CONSTRUCCIÓN DIRECTA DE POZOS O CON  
SONDEO DE RECONOCIMIENTO PREVIO**

## EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS ROCAS INTRUSIVAS Y METAMÓRFICAS

Nota previa importante: El material o documentación para la redacción de este capítulo está tomado principalmente de la excelente obra **AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ROCAS DURAS**, publicada en castellano en 1985, como el número 33 de la colección **Estudios e informes en hidrología**, por la UNESCO, como parte del proyecto 8.6 del Programa Hidrológico Internacional, ISBN 92-3-301980-2, y redactado por un grupo de expertos encabezados por el Prof. Ingemar Larsson entre 1977 y 1979 (300 páginas, más 15 láminas estereoscópicas, en blanco y negro, fuera del texto, más un pequeño vocabulario terminológico).

Puede obtenerse mediante compra por correo en la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, UNESCO, 7, place de Fontenoy, 75700-PARIS.

A pesar de sus pequeños defectos en la traducción al castellano, su lectura se considera imprescindible para los profesionales que trabajan en este tipo de materiales o formaciones acuíferas, tanto por resumir de una manera muy general o global, a escala planetaria, los conocimientos cualitativos y cuantitativos que se poseen sobre este tema, como por los seis ejemplos de investigación hidrogeológica real que se detallan en la segunda parte del texto, así como por la extensa bibliografía citada al final.

Otra excelente obra de consulta es **HYDROLOGY OF HARD ROCKS**, de la Editorial Heise.

## 1. INTRODUCCIÓN

Este tipo de formaciones geológicas (**rocas ígneas y metamórficas** en general, con todas sus variedades o tipos litológicos, diques o rocas filonianas, etc.), son el ejemplo típico de materiales **poco, muy poco o nada permeables**, por lo que poseen poco, muy poco o ningún interés hidrogeológico, desde el punto de vista de **obtención de notables recursos hídricos subterráneos** (caudales superiores a algún litro por segundo, por lo general, considerando siempre caudales de régimen o operativos).

Pero la realidad geológica del planeta demuestra que, en muchas zonas del mismo, aquéllas son las formaciones rocosas predominantes, por lo que su **interés hidrogeológico, desde el punto de vista de distribución geográfica**, es bastante superior.

Por otro lado, también en muchas **zonas áridas o semiáridas, con evidente falta de agua**, y, por desgracia, en determinados países en vías de desarrollo, suelen formar amplias zonas del subsuelo, por lo que no **queda otra solución que acudir a los escasos caudales** que suelen proporcionar estas formaciones.

Por ejemplo, en el texto citado, se menciona que la población que habita en áreas cubiertas por este tipo de formaciones geológicas es de **unos 30 millones de personas en la América latina, 50 millones en África y algunos centenares de millones en Asia**.

En nuestro país, el área cubierta por este tipo de formaciones es de un 30 %, aproximadamente.

Así pues, con todos estos razonamientos anteriores, se comprende su interés por su estudio.

En lo que se refiere a la **tipología o litología específica o petrología** de detalle de las diferentes rocas consideradas, en tanto que **contenedoras o formadoras** de acuíferos (granitos, granodioritas, gneises, cuarcitas, esquistos, filitas, pizarras, etc.), la experiencia demuestra que aquélla no importa demasiado a la hora de estudiar los recursos hidráulicos de las mismas, dada su compacidad y ausencia de porosidad y permeabilidad primarias, en general.

En otras palabras, la litología concreta de estas rocas influyen de manera muy escasa en sus propiedades hidrológicas, y, por lo tanto, como fuente o origen de recursos hídricos importantes.

Ello se debe a que la **porosidad y permeabilidad de estas rocas**, necesarias para su aprovechamiento hidrológico por parte del hombre, se deben, general y fundamentalmente, a procesos de **alteración física, química o fisicoquímica, es decir, procesos de carácter secundario**, con independencia del tipo litológico de la roca original.



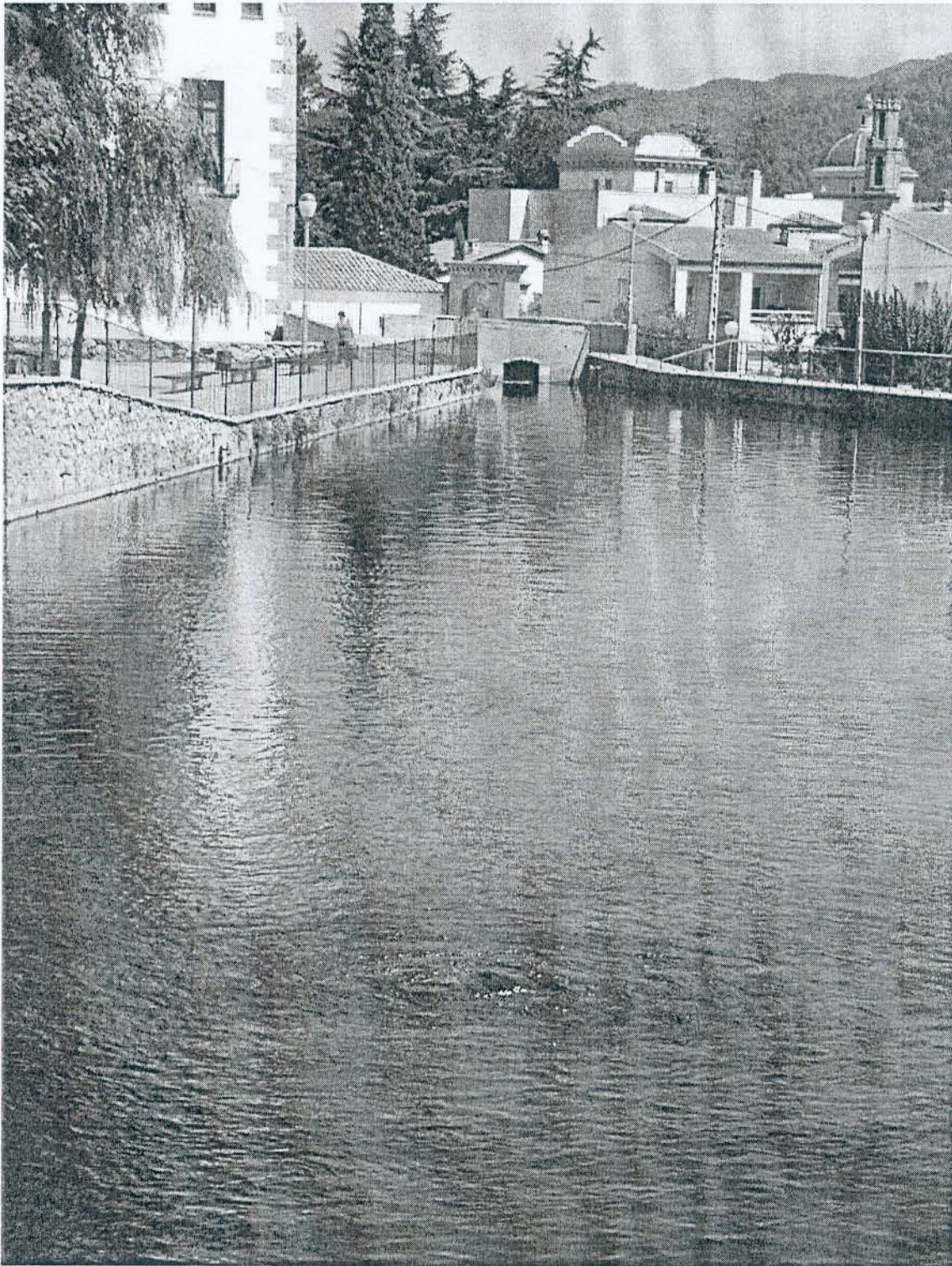
PIZARRAS, CUARCITAS Y CALIZAS METAMÓRFICAS DEL CAP DE CREUS (Alt Empordà) (ORIGEN LEGENDARIO DE LA DEU DEL CANIGÓ)



GRANITOS Y RESTOS DE FILONES O DIQUES DE APLITAS/PEGMATITAS EN LA BASE DE LA PRESA DE SAU, CAUCE DE LA RIERA MAJOR (OTOÑO 2004)

ALTA COMPACIDAD. MUY ESCASA POROSIDAD Y PERMEABILIDAD MUY BAJA O NULA

Así, los casos en que estas formaciones dan o proporcionan caudales muy importantes o excepcionales, son debidos siempre a estructuras hidrogeológicas muy especiales y concretas (**pizarras muy tectonizadas por fallas cabalgantes en Capellades, granitos también muy tectonizados en profundidad en Sant Cugat del Vallès, con aguas termales, por ejemplo**).



SURGENCIA DE UN POZO CONSTRUIDO EN 2001 PARA LA ALIMENTACIÓN DE LA BASSA DE CAPELLADES, ENTONCES SECA. CEGADO PROVISIONALMENTE CON UNA LOSA DE 4000 kg. (FEBRERO DE 2005).  
SE INTENTARÁ CEGARLO O SELLARLO DE MANERA ADECUADA, SI ES POSIBLE

Se recuerda que es posible encontrar casos de estructuras carstificadas en materiales o rocas calcáreas metamorizadas (mármoles, por ejemplo), que si bien, desde el punto de vista litológico, caen dentro del tipo de rocas duras, desde el punto de vista hidrogeológico, deberían incluirse dentro de las rocas carbonatadas *sensu strictu*, por lo menos, en la opinión del autor.

La figura de la página siguiente resume, esquemáticamente, este esquema general.

Para terminar, no debe olvidarse que este es el campo en el cual la labor del buen profesional de las aguas subterráneas es **más difícil**, por la dificultad de determinar los mejores emplazamientos para la captación de agua, debido a la **dificultad de una buena cartografía geológica detallada**, la **relativa ineficiencia de la geofísica**, la gran importancia de la **evaluación adecuada de los datos estadísticos** (situación, localización y frecuencia de los sistemas de diaclasas y fracturas verticales o subverticales -que son las que proporcionan el agua a las captaciones-, etc., etc.).

## 2. LA ALTERACIÓN SUPERFICIAL O METEORIZACIÓN

El agua subterránea circula por las capas alteradas más superficiales, mantiene el caudal de los arroyos, y representa el caudal base de gran número de corrientes superficiales de agua en estas zonas, así como también de numerosas fuentecillas o rezumes. También permite la percolación del agua de infiltración hacia los niveles con fracturas más profundas, subyacentes a las zonas alteradas.

Esta **alteración superficial** incluye la **desintegración o desagregación física** (dilataciones, congelación del agua en las grietas, acción de las plantas, disolución, etc.), y la **descomposición química** de los minerales originales de la roca (disolución, oxidación, hidrólisis, etc.), así como la formación de nuevos minerales secundarios.

Es más intensa en los trópicos y menos intensa en las regiones polares, y se manifiesta principalmente en un notable incremento de la porosidad original.

Esta alteración superficial depende de:

- **La superficie relativa de la roca, y su modificación por la alteración mecánica**
- **La solubilidad relativa de la roca original y de sus productos de alteración**
- **El relieve y la topografía del terreno**
- **El tamaño de las partículas de las rocas encajantes**
- **La permeabilidad original de la masa rocosa**

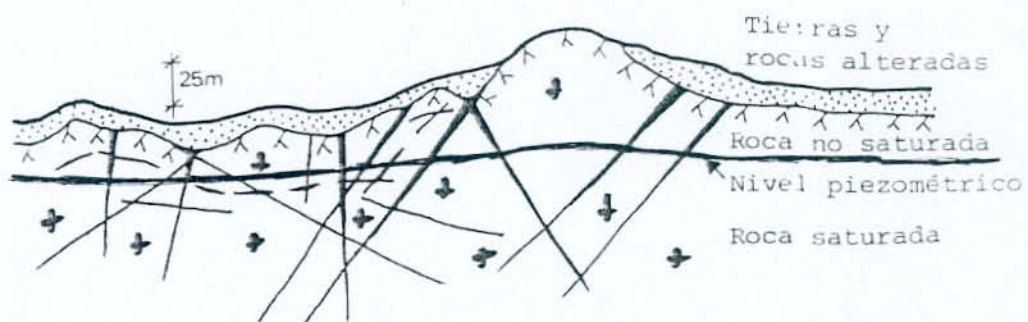


Figura 2.1.2.2 Zonas típicas de acuíferos por fractura en rocas duras

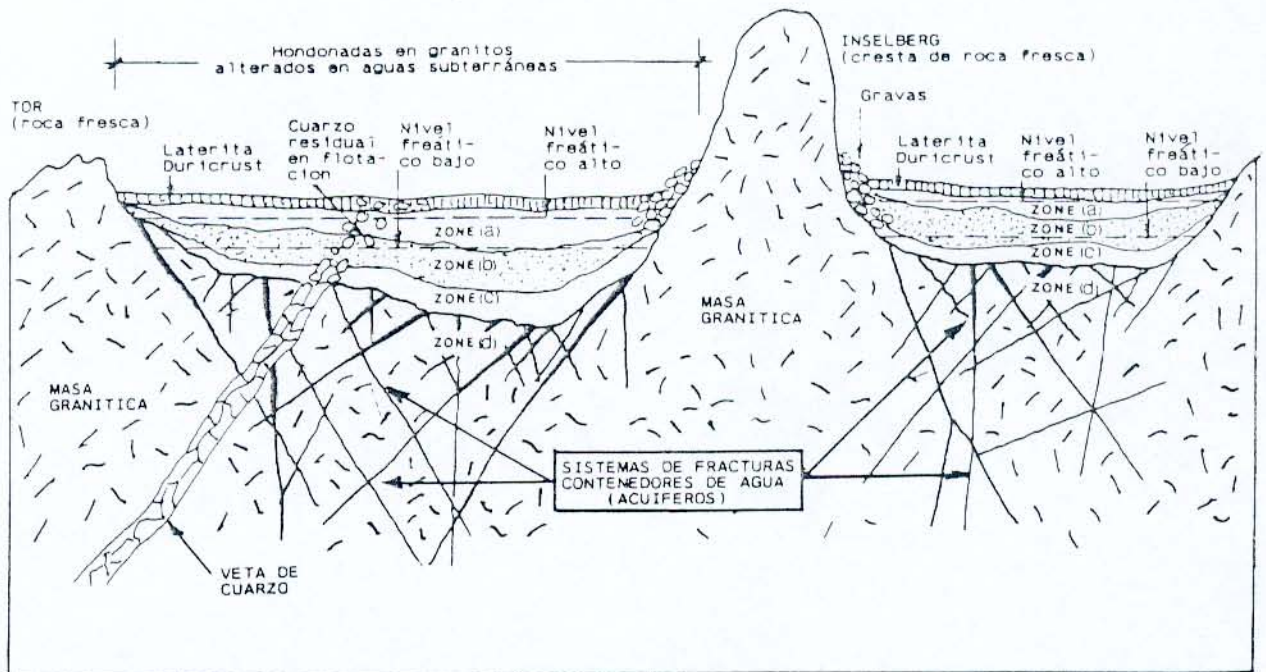


Figura 2.1.3.1 Esquema de hondonadas en granitos alterados, formando acuíferos separados por protuberancias de masas de granito sin alterar. Laterita duricrust: carapachos ferruginosos duros pasando en capas más hondas a arcillas ferruginosas y concrecciones ferruginosas.

Zona (a): arcillas arenosas y arenas arcillosas, generalmente concrecionarias y caoliníticas, alta porosidad pero baja permeabilidad.

Zona (b): masas de arcilla alteradas, generalmente plásticas, en las cuales los minerales estables pueden encontrarse en su forma original. Alta porosidad pero baja permeabilidad.

Zona (c): roca progresivamente alterada que pasa a ser una capa terrosa de agregados cristalinos disgregados y fragmentos de roca. Baja porosidad pero permeabilidad apreciable.

Zona (d): roca fresca fracturada con fracturas que constituyen acuíferos.

7 7/19



- La temperatura de la roca, y sus variaciones diarias o temporales
- La composición química y la cantidad del agua de infiltración (generalmente, una parte de la lluvia)
- La distribución de las cantidades disponibles de oxígeno, anhídrido carbónico, nitrógeno y otros gases
- La naturaleza y abundancia de la macro y microfauna activa en el sistema. Lo mismo cabe decir de la acción de la flora sobre el sistema.

Esta alteración superficial puede ser de diferente origen:

#### **Física o mecánica (dominante en los climas áridos y fríos)**

Incluye la **disgregación o desintegración**, producida a su vez por cambios de temperatura estacionales o diarios, congelación y deshielo del agua, cristalización del agua, crecimiento de raíces de plantas, exfoliación, diaclasación, etc.

#### **Química (dominante en los climas húmedos y cálidos)**

Incluye un conjunto de los complejos mecanismos de hidrólisis, quelación, intercambio de cationes, diálisis, oxidación y reducción, carbonatación e hidratación, secado, etc., etc. Probablemente, el proceso más importante es la hidrólisis con la ayuda del CO<sub>2</sub> del aire.

Así, y como un ejemplo, una serie de alteración progresiva de algunos minerales es: olivino → piroxeno → anfíboles → biotita → anortita → albita → ortoclasa → moscovita → cuarzo.

#### **Biológica**

Incluye toda la actividad de la microflora (bacterias), macroflora (plantas, algas, líquenes y musgos) y macrofauna (gusanos, animales de madriguera).

#### **Extensión y espesor de las capas alteradas**

En la figura de la página siguiente, se reproduce un esquema teórico de las estructuras hidrogeológicas que pueden hallarse en este tipo de materiales. Esta **profundidad de alteración debe entenderse globalmente**, es decir, como el conjunto o suma de la zona alterada superficial más la zona fracturada, fisurada o diaclasada, de carácter generalmente más profundo.

En general, en los climas templados, es raro encontrar niveles alterados con cierta permeabilidad a profundidades superiores a los **10, 15 quizá algo más de 20-25 m, siempre, evidentemente, en función de la situación,**

**climatología de la zona**, estructuras hidrológicas especiales, el relieve topográfico, etc.

Sin embargo, en los **climas cálidos**, el espesor de la zona alterada suele ser **bastante mayor**, sobretodo por la mayor potencia de la zona superficial, disgregada o meteorizada.

En este sentido, la atenta lectura de las tablas de las cuatro páginas siguientes (tablas 2.1.3.1., 2.1.3.2., 2.2.3.1. y 2.2.3.2.), reproducidas a partir del libro de referencia, es muy ilustrativa, al relacionar los caudales y profundidades de muchos conjuntos de pozos en diferentes partes del mundo, juntamente con las condiciones hidrológicas de cada emplazamiento. Se recomienda su atenta lectura, sobre todo en lo referente a la cantidad de pozos utilizados para evaluar las conclusiones finales (fiabilidad estadística).

Sin embargo, una vez más, se insiste en que las condiciones locales de cada emplazamiento influyen de manera decisiva, tanto en el espesor potencialmente permeable de los niveles estudiados, como en las condiciones y los valores de la permeabilidad, por lo que pueden encontrarse diferencias importantes, en estos aspectos, aún en distancias pequeñas o medias.

### 3. LA ALTERACIÓN PROFUNDA (FRACTURAS, DIACLASAS, FALLAS)

En profundidad, cuando el espesor de roca alterada se ha reducido a su mínima expresión, las superficies de discontinuidad, de **carácter fundamentalmente plano (o bidimensional), y generalmente vertical o subvertical**, son las responsables de los dos aspectos más importantes de las aguas subterráneas:

**Almacenar el agua infiltrada** y albergada temporalmente en las capas más superficiales, además de

**Facilitar su percolación** hacia los pozos o puntos de drenaje.

En el primer libro mencionado repetidamente, se discuten los distintos tipos y orígenes de las fracturas, fallas, diaclasas, discontinuidades geológicas, etc., así como su papel en la hidrología subterránea de cada zona (**páginas 22 a 41 del libro mencionado**).

### 4. PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Porosidad y permeabilidad

Los tres factores principales que pueden aumentar significativamente la porosidad, son: **la meteorización, la fracturación y la disolución**, siendo la más importante, con mucho, el primero de ellos, que suele multiplicar el valor de la porosidad inicial o primaria por 10 o por 20.

Tabla 2.1.3.1 Rendimientos típicos de pozos en rocas duras alteradas, en Africa (Naciones Unidas, 1973)

País	Provincia	Tipos de roca	Rendimiento por pozo (m <sup>3</sup> /h)	Observaciones
Angola	Catuiti	Granitos	De 3 a 30	
Botswana		Granitos, gneises y esquistos	De 0,5 a 10	
República Centroafricana		Gneis, esquistos y cuarcitas	De 0,5 a 5	De <u>400 pozos</u> excavados a una profundidad de 3 a 15 m. durante el período 1.967-69. el 90% fueron productivos en la capa alterada encima del basamento
Benin	Reg. Central	Granitos, gneis, esquistos de lima	De 1 a 4	
República Democrática del Congo (Zaire)	Oriental	gneises, esquistos y cuarcitas	De 1 a 8	Pozos de 25 a 100 m. de profundidad, capacidad específica 0,4 a 3,6 m <sup>3</sup> /h/m.
Etiopía	Sidamo	Granito, gneises y esquistos	Bajos	Estratos alterados poco desarrollados. Rtos. de zona de fracturas bajas y agua generalmente de mala calidad
Ghana	Planicies de Accra Regiones altas y nortenas	Granitos, gneises, cuarcitas esquistos biotíticos y graníticos	De 0,5 a 11 De 0,4 a 24	<u>280 pozos</u> de una media de 34 m de profundidad
Costa de Marfil	Región Oeste	Granitos	De 2 a 5	Pozos de 10 a 15 m. de profundidad
Mozambique	Región Norte y Central	Granitos, ortoneises, paraneises ferrromagnéticos	De 4 a 12 Bajos	Estratos alterados gruesos y bastante permeables. Estratos arcillosos e improductivos
Sur Africa	Zona de basamentos Precambrianos	Granitos, gneises y esquistos	De 0,5 a 10	Estratos alterados de 30 a 150 m. de espesor. Detectados mediante estudios sobre resistividad eléctrica
Zimbabwe	Area Central			
Sudán	Sur de Kordofan	Granitos, gneises y esquistos	De 0,5 a 6	Estratos alterados de 10 a 15 m. de espesor
Swaziland	Area Central	Granitos, gneises	De 0,5 a 6	Estratos alterados de 10 a 30 m. de espesor

→ 8/19  
(de 4 tablas)

Tabla 2.2.3.1 Rendimientos de pozos en rocas duras en Africa (U.N., 1973)

País	Precipitación media (mm)	Provincia o zona	Tipo de roca	Rendimiento por pozo (m <sup>3</sup> /h)	Profundidad de los pozos	Observaciones
Angola	1.000	Catuti Sur	Metamórficas, granitos alterados tectonizados	Media: 0,6 3 a 30		Rendimientos de fractura de hasta 80 m <sup>3</sup> /h.
Botswana	100-250		Granitos, gneises y esquistos	0,4 - 10		Bajo condiciones geológicas excepcionalmente favorables
República Centro-africana	800-1.400		Gneises, esquistos y cuarcitas	0,5 a 5	3-15	De 400 pozos excavados durante el período 1.967-69 el 90% eran productivos en la capa alterada superior al basamento
Benin	750-1.250	Región Central	Granitos, gneises y esquistos	1 - 4		
Etiopia	1.000-2.000	Sidamo	Granitos, gneises y esquistos	Baja		Estratos alterados pobremente desarrollados. Bajos rendimientos de fracturas y aguas de poca calidad en general
Ghana	750-2.000	Llanuras de Accra	Granitos, gneises, cuarcitas y esquistos biotíticos	0,5 - 11	Media 34	
		Regiones Altas y norteñas		0,4 - 24		Profundidad basada en 280 pozos
Costa de Marfil	1.000-2.000	Región Occidental	Granito	2 a 5	10 - 15	
Malawi	800 - 1.500		Gneises biotíticos	5	60 (media)	
			gneises w/doleritas	0,5	30 "	
			gneises grafiticos	4	45 "	
			gneises (complejo basal)	1,2 - 3,6	25-40 "	1,8 m <sup>3</sup> /h. Media
			Zona alterada de gneises	1,2 - 5	25-40 "	3,5 m <sup>3</sup> /h. Media
Mozambique	500	General	Ortogneises, granitos y paragneises	4 - 8		w/"gruesa" superficie de estratos alterados (computado 10 - 25 m <sup>3</sup> /h.)
Zimbabwe	300-1.200	Area Central				
Sudán	20-500	Kordofan del Sur	Granitos, gneises y esquistos	0,5 - 6		Estrato alterado de 10 a 30 m. de espesor
Suráfrica	400-1.500	Area de basamentos Precambrianos	Gneises graníticos y esquistos	0,5 - 10		Estratos alterados de 30-150 m. de espesor. Detectado por estudios sobre resistividad eléctrica. El 50% de los pozos de sondeo más o menos, recogen agua del estrato alterado
Swaziland	500-1.750	Area Central	Gneis granítico	2 a 8	20-30	Estrato alterado de 10 a 30 m. de espesor
Togo	1.000	Dapango	Gneis granítico	3 - 175	0-8	Perforación: 6-18 m. en partes artesianas
		Kande	esquistos	5 - 1	0-11	
		Dahomeyan	gneis, granitos y migmatitas	25 - 50	0-20	
Uganda	1.000	General	Gneis granítico	2 - 2	30-100	
Alto Volta	400-1.000	General	Gneises graníticos y esquistos	2 - 2		3 m <sup>3</sup> /h. máxima computada
Zaire	1.500-2.000	Oriental	Zona alterada en basamentos Precambrianos	1 - 8	25-100	0,2-2 rto. específicos l/s/m.
		Maniema	" " "	1 - 8		" " "
		Bajo Congo	" " "	1 - 8	40-100	
Zambia	500-1.500	Kalomo-Choma	Gneises graníticos alterados, vetas de cuarzo y pegmatitas	3 - 5,5	35	Vetas de cuarzo escasas (rendimientos de hasta 11 m <sup>3</sup> /h.)
		Paso de Mulani	esquistos biotíticos	1 - 2		
			vetas de cuarzo	1 - 2		
		Cinturón de Copper	esquistos	1 - 2		

Tabla 2.2.3.2 Datos sobre rendimientos de pozos en rocas duras en el Hemisferio Occidental, India y Corea (U.N. 1973)

País	Precipitación media (mm)	Provincia o zona	Tipo de roca	Rendimiento por pozo (m <sup>3</sup> /h.)	Profundidad de los pozos	Observaciones
Brasil	300	Región semiárida (Nordeste)	Granitos, gneises y esquistos y otras rocas ígneas y metamórficas	0,3 - 8 (Media 4)	20 - 40 m.	El estrato alterado tiene de 5 a 10 m. de espesor. El agua generalmente contiene más de 3.000 mg/l. Capacidad específica de 0,1 a 1,0 m <sup>3</sup> /h/m.
	2.000	Regiones húmedas (Sur y Centro-Sur)		0,5 - 20 (Media 4)	10 - 30 m.	El estrato alterado tiene de 10 a 20 m. de espesor. El agua generalmente contiene menos de 1.000 mg/l. Capacidad específica 0,2 a 4 m <sup>3</sup> /h/m.
Canadá	750 - 1.200	General	Gneises, granitos	1,0 - 3,0	30 m.	A profundidades mayores de 30 m. generalmente se dan aguas salinas
India	700	Región semiárida (Rajasthan)	Granitos pizarras	0,9 - 2,8 0,6 - 4,0 (Media 2,2)	20 - 40	Los pozos horadan estratos alterados de 12 a 25 m. de espesor. Aguas salobres a ligeramente salinas
			Granito	0,15 - 15 (Media 3,2)	13	Los pozos perforan estratos alterados a profundidades generalmente menores de 15 m.
	1.500	Regiones subhúmedas (Karnataka)		Cordiorita, hornoblenda y gneises biotíticos Esquistos cristalinos, esquistos arcillosos y filitas	0,2 - 10 (Media 3,2) Bajos	
Corea	1.100-1.300	General	Granito	Media 12,2	74 (Media)	Rendimientos del orden: 0,2 -34 (39 pozos), profundidad pozos: 30-200 m.
			Esquistos	Media 7,0	97 (Media)	Rendimientos del orden: 0,6 -17 (22 pozos), profundidad de pozos: 30-146 m.
			Gneises	Media 5,3	88 (Media)	Rendimientos del orden: 0,5 -21 (16 pozos), profundidad de pozos 42-135 m.
Estados Unidos	500-1.000	Región Piedmonte estados sureste	Gneises y esquistos, generalmente con granitos y otras rocas intrusivas	3 - 10 ocasionalmente 20 ó más	40 - 50	El estrato alterado tiene de 15 a 30 m. de espesor. El agua contiene menos de 500 mg/l.
			Nueva Inglaterra Connecticut	Granitos Gneises	2,6 (Media) 2,4 (Media)	44 (Media) 40 (Media)
		New Jersey	Esquistos	3,1 (Media)	44 (Media)	Basado en 53 pozos
			Gneises biotíticos	2,2 (Media)	37 (Media)	Basado en 29 pozos
			Granito (hornablenda)	2,1 (Media)	48 (Media)	Basado en 81 pozos
			Granito piroxenos y gneises	1,9 (Media)	47 (Media)	Basado en 162 pozos
		Anfibolita	1,5 (Media)	49 (Media)	Basado en 31 pozos	
		Gneis cuarzo diorita	1,4 (Media)	71 (Media)	Basado en 31 pozos	
Uruguay	1.000 - 2.000	Sur	Granitos, gneis-metamórficos	0,2 a 8 (Media 5)	20 - 40	Capacidad específica: 0,1 a 1,9 m <sup>3</sup> /h/m.

Tabla 2.1.3.2 Rendimientos típicos de pozos en rocas duras alteradas en el Hemisferio Oeste de la India

País	Provincia	Tipos de roca	Rendimientos por pozo en (m <sup>3</sup> /h)	Observaciones
Estados Unidos	Región Piedmonte Sur, Estados Occidentales	Gneises y esquistos más comunes con otras rocas de inyección	3 a 10, ocasionalmente 20 ó más	El grosor de las capas alrededor de 15 a 30 m. de espesor. La mayor parte de los pozos en capas alteradas tienen menos de 45 m. de profundidad. Agua contenida: menos de 500 mg/l.
Brasil	Región Semiárida (Noroeste)	Granitos, gneises, esquistos y otras rocas ígneas y metamórficas	0,3 a 8	Las capas alteradas tienen de 5 a 10 m. de espesor. Pozos de 20 a 40 m. de profundidad. Cantidad de agua menos de 3.000 mg/l., capacidad específica 0,1 a 1 m <sup>3</sup> /h/m.
	Región húmeda	d:0	0,5 a 15 media 6	Estratos de 10 a 20 m. Pozos de 10 a 30 m. de profundidad. Agua contenida generalmente menos de 1.000 mg/l. Capacidad específica 0,2 a 4 m <sup>3</sup> /h/m.
Uruguay	Sur	Granitos, gneises, metamórficas	0,2 a 8 media 5	Pozos en estratos alterados de 20 a 40 m. de profundidad. Capacidad específica 0,1 a 1,8 m <sup>3</sup> /h/m.
India	Región semiárida (Rajasthan)	Granitos  Pizarras	0,9 a 2,8  0,6 a 4 media 2,2	Pozos en estratos alterados de 12 a 25 m. de grosor. El agua es impura, salina.
	Regiones subhúmedas (Karnataka)	Granitos  Cordierita, hornablenda y gneises biotíticos, esquistos cristalinos, esquistos arcillosos y filitas	0,5 a 15 media 3,2  D:0  Baja	Pozos en estratos alterados de menos de 15 m. de prof. D:0  D:0  Estratos alterados con acuíferos pobres

Curiosamente, esta porosidad decrece en profundidad, mientras que la permeabilidad suele o puede crecer, si se hallan abundantes fracturas o diaclasas, aunque con un carácter **fundamentalmente local o muy localizado en el espacio** (lo cual incide de manera primordial en la **dificultad de su localización** en los trabajos de investigación hidrogeológica o de emplazamiento de captaciones, por la heterogeneidad y anisotropía de estas rocas duras).

En general, la porosidad total de la zona de alteración puede ser **notable (40 a 50 %)**, sobretodo la más superficial, pero al ser estos poros, creados por la meteorización, muy pequeños, su conductividad hidráulica es bastante baja, o muy baja, aproximadamente del orden de **10E-2 a 10E-5 m/día**.

La **permeabilidad** se incrementa también con los tres factores citados (meteorización, fracturación, disolución), pudiendo multiplicar el valor original de la misma por **1000 o 10.000 veces**, aunque se insiste en el marcado carácter **de localización espacial** de esta conductividad hidráulica. En este caso, el factor más importante en su incremento es la **fracturación**.

Su influencia en los caudales finales aprovechables por el hombre, depende, además de los factores anteriores, de su posición geomorfológica dentro del macizo global de roca dura (ver la **figura de la página siguiente**).

De la misma manera, el estudio de los histogramas de la **página siguiente** muestra como casi el 90 % de los pozos en granitos y gneises proporcionan alrededor de un **litro por segundo como caudal de explotación, como máximo**, mientras que en más de la mitad de los valores obtenidos, los valores oscilan alrededor del medio litro por segundo, es decir, de unos 1800 litros por hora.

Se recuerda que estos valores son **caudales instantáneos, no caudales de régimen o de explotación para tiempos de bombeo largos o importantes**:

Un caudal de un litro por segundo, o menos, puede agotar en algunas horas el volumen de agua almacenada en una captación en estos acuíferos, a no ser que el volumen de almacenamiento de agua en la misma sea correlativamente grande.

En consecuencia, habrá que esperar a la **recuperación** de la captación para volver a bombear, lo cual puede tardar horas o días.

Por ello, deben conocerse o estimarse las medidas físicas de la captación (profundidad, columna de agua, etc.), el caudal extraído, sus variaciones temporales, y efectuar los **cálculos y los gráficos aritméticos correspondientes**, antes de lanzarse a cualquier evaluación hidrogeológica de los parámetros de esta captación, so pena de cometer graves errores.

Desde otro punto de vista, en las dos figuras apaisadas de las dos páginas siguientes, se dan las correspondencias entre los caudales de los pozos, los caudales específicos y sus respectivas profundidades, para un total estudiado

*figura hidrográica*

*modificat al PC*

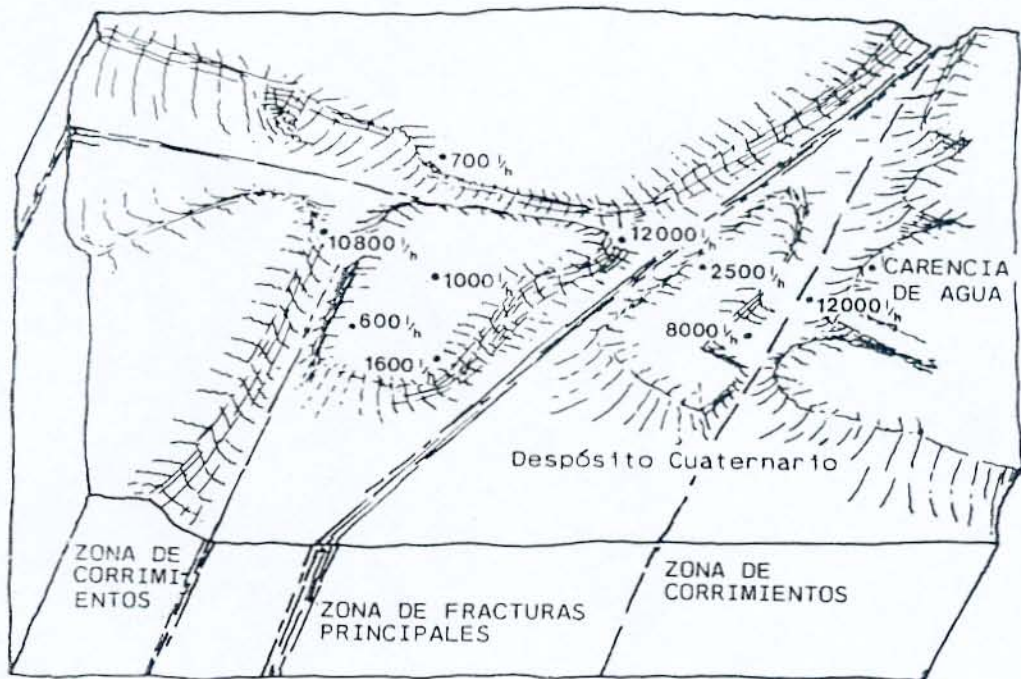


Figura 2.2.2.1 Diagrama en bloque mostrando zócalos en una zona de gneises graníticos en el Sur de Suecia. Los rendimientos de los pozos perforados se dan en litros por hora (según Larsson, 1.963).

> 9/19



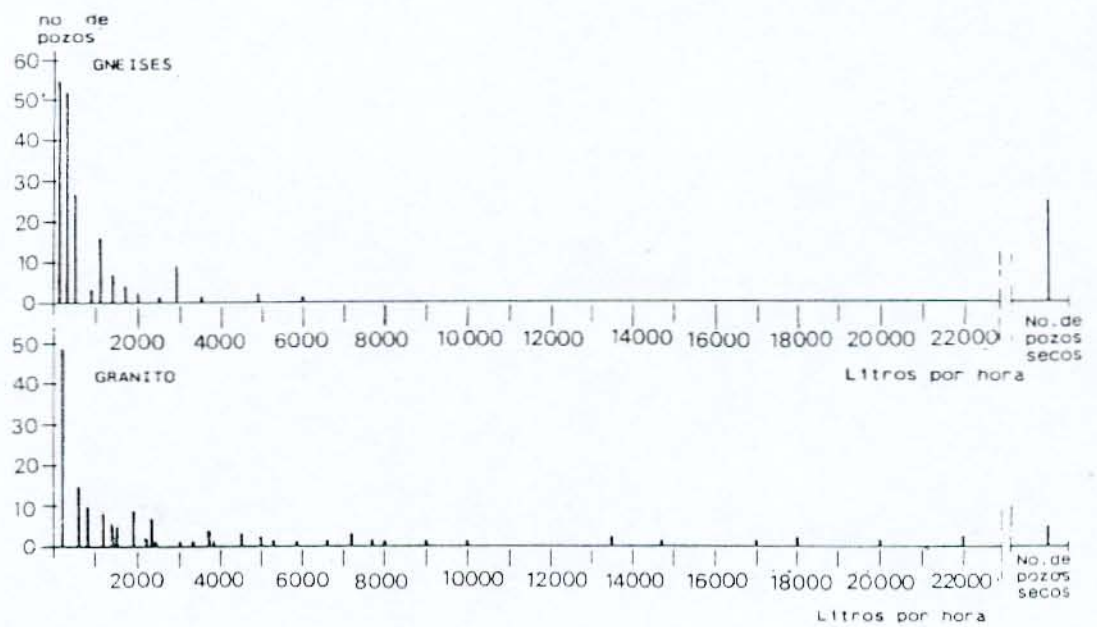


Figura 2.2.2.3 Rendimiento de pozos perforados en un área granítica en Suecia (según Larsson, 1.977). (Reproducido con autorización de la Asociación Sueca para la Higiene del Agua)

79/19

y  
diferenciación

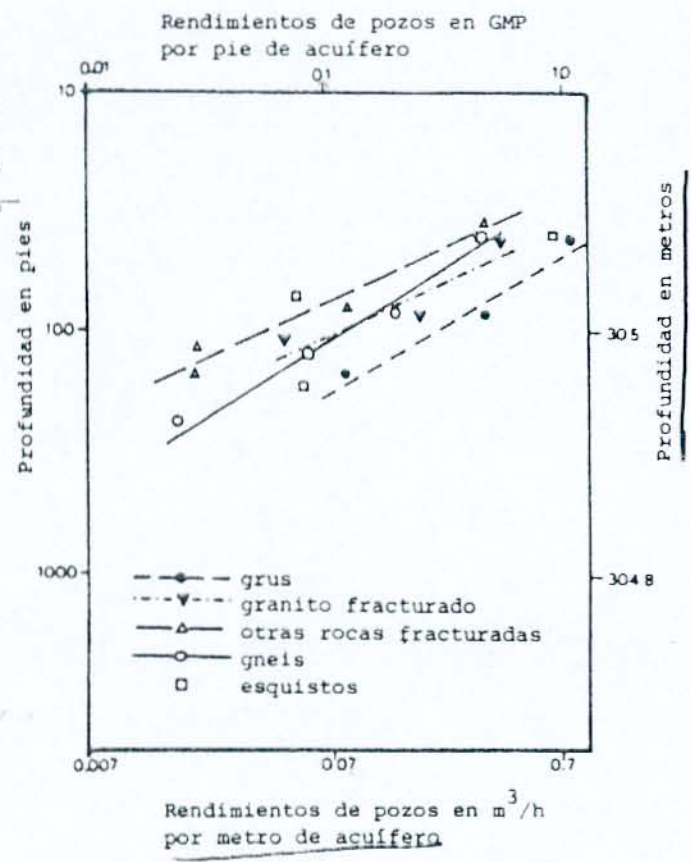


Figura 2.2.3.9 Productividad de pozos en relación con la profundidad de éstos, en rocas cristalinas en el área del Llano (Texas). Basado en 848 pozos en grus, granito, gneises, esquistos y otras rocas fracturadas. (Modificado según Landers y Turk, 1.973).

29/19

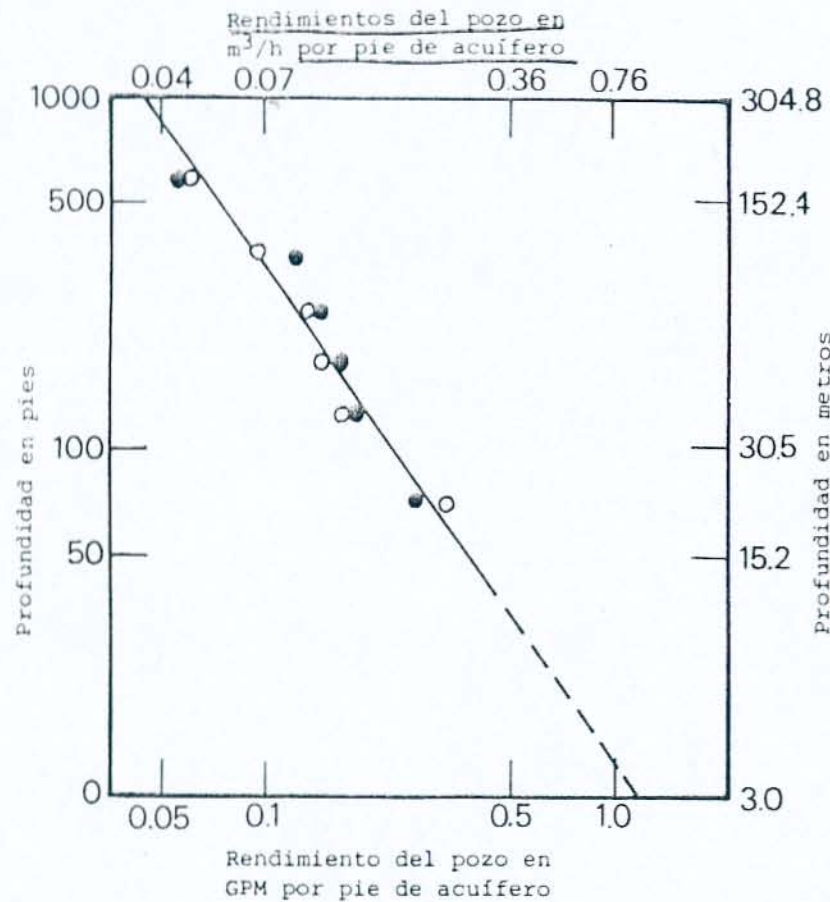


Figura 2.2.3.2 Rendimientos de pozos en rocas duras cristalinas en el Este de Estados Unidos. Los círculos representan rendimientos medios en rocas graníticas para 814 pozos. Los puntos negros representan rendimientos en rocas esquistosas para 1,522 pozos. (Modificado de Davis y Turk, 1.964).

79/19

de más de 1600 pozos en USA. En ellas se aprecia la escasa importancia de estos caudales (alrededor de 1 a 2 litros/segundo, como máximo).

Como resultado o conclusión global de todo ello, se comprende que **perforar más de 30 a 50 m de profundidad**, por lo general, **no suele ser recomendable en cuanto a incrementar, de manera substancial o significativa, el caudal de la captación**, ya que la posibilidad de encontrar fracturas o diaclasas abiertas es cada vez menor (la roca suele ser más compacta y dura), las que puedan existir se van cerrando progresivamente, etc., etc. De hecho, **este planteamiento es más económico que hidrológico**: el sobrecoste de perforar 10, 20 o más metros para incrementar el caudal del pozo en un 5 por ciento solamente (muchas veces, incluso menos de ese 5 por ciento) no suele estar justificado, además de otros **posibles problemas** (mayor dificultad en la perforación, desviaciones de la vertical, imposibilidad de entubación o de colocación y extracción posterior de la bomba, etc.).

Finalmente, en lo referente a los ensayos de bombeo realizados en pozos en estos materiales, no debe perderse de vista la gran importancia de la **heterogeneidad y anisotropía de los materiales y de las estructuras hidrológicas que aportan el agua a los pozos**, sobretodo a la hora de interpretar los resultados obtenidos.

Una vez más, se insiste en la necesidad de dibujar y evaluar esquemas acotados de la captación antes de realizar cualquier ensayo o prueba de bombeo, para considerar el almacenamiento de la captación como aportes al agua bombeada.

Una vez más, y como conclusión, no debe olvidarse que obtener **más de un litro por segundo -como caudal de régimen-** ya puede considerarse como un éxito en este tipo de acuíferos, salvo casos muy especiales.

## 5. PERFORACIÓN DE CAPTACIONES

En estas formaciones, pueden emplearse los **dos sistemas tradicionales de perforación: la excavación a mano o con la ayuda de medios mecánicos más o menos rudimentarios**, en función de la tecnología existente o disponible en la zona, y de acuerdo con las posibilidades económicas, y los **sistemas de perforación modernos, con sondas especiales** (ver la tabla de la página siguiente).

En la excavación a mano en la roca alterada, o con explosivos si la roca es suficientemente dura, a veces es obligado proceder a un revestimiento en las zonas más superficiales para evitar los desprendimientos y también la eventual contaminación por aguas de mala calidad, que puedan caer o filtrarse hacia abajo desde la superficie del terreno.

La realidad es que, en la actualidad, en los países desarrollados, este tipo de perforación o excavación manual ha caído prácticamente en desuso, debido a los altos costes unitarios de la misma, si se quiere trabajar con un mínimo de seguridad, y rapidez en la construcción. No es así, sin embargo, en países en

Tabla 3.3.1.1. Ventajas de los pozos excavados frente a los pozos perforados en terrenos de rocas duras. El cuadro se basa en experiencias en India Peninsular.

Pozos excavados	Pozos perforados
1. Difíciles de proteger contra la contaminación.	Fáciles de proteger contra la contaminación.
2. Requiere unos 6 meses construir un pozo de 15-20 m. de profundidad y 10-15 m. de diámetro. Sistema intensivo de trabajo.	Con la perforación con martillo neumático es posible construir un pozo de 6 pulgadas de 40 a 60 m. de profundidad en un día o dos. Mediante el sondeo por percusión se necesitan de 40 a 60 días para perforar un pozo de esta profundidad, sistema intensivo en capital.
3. Los costes por unidad del bombeo son bajos porque el agua se bombea del almacenamiento en el pozo y el descenso del nivel del agua no puede sobrepasar la profundidad del pozo.	Los costos por unidad de volumen de agua bombeada son altos debido a la gran altura de elevación.
4. Los pozos pueden ser bombeados de forma intermitente mediante bombas centrífugas, estas bombas son baratas y de fácil mantenimiento, sus niveles de bombeo son de 50 a 100 m <sup>3</sup> /h., aunque el flujo medio es de 3.2 m <sup>3</sup> /h.	Estos pozos requieren bombas sumergibles que son costosas y de difícil mantenimiento. Los pozos pueden ser bombeados de forma constante pero con niveles de bombeo medios de sólo 3.0 m <sup>3</sup> /h.
5. El agua puede dedicarse de forma intensiva al riego de tierras sin almacenamiento de superficie.	El agua no puede dedicarse de forma intensiva al riego si no se dispone de almacenamiento de superficie.
6. Las bombas centrífugas pueden ser eléctricas o diesel.	Las bombas sumergibles requieren potencia eléctrica.
7. El pozo puede ocupar hasta 0.2 has. de tierra cultivable.	El pozo ocupa muy poco terreno.
8. Los pozos pueden secarse durante ciclos secos prolongados.	Las variaciones estacionales afectan menos al nivel de los pozos, y por lo tanto, son más eficaces durante los ciclos secos.
9. Son más convenientes para riego en condiciones económicas normales.	Se adaptan mejor como suministradores de pequeños pueblos y municipios en condiciones económicas normales.
10. Construcción manual o mecánica.	Necesitan de equipos de perforación de importación.

>10/19

vías de desarrollo o con graves dificultades tecnológicas de perforación, de bombeo o de achique.

En aquellos casos en que se pueda perforar con medios mecánicos modernos, se usa la **percusión con cable** o la **rotación directa o inversa**, con la ayuda de **aire comprimido** (la rotopercusión) o de **agua** (la rotación convencional), que a veces pueden combinarse entre sí, según las características hidrogeológicas del emplazamiento del pozo.

### **Ventajas de la percusión con cable**

- Costes bajos de instalación del equipo
- Costes bajos de transporte del equipo
- Costes bajos por día de operación
- Rápida instalación del equipo
- Velocidades de avance comparables a los sistemas de perforación en rocas duras para poca profundidad
- Extracción de muy buenas muestras de los terrenos atravesados
- Identificación muy fácil y efectiva de los acuíferos atravesados
- No se precisan fluidos de circulación, excepto en la zona no saturada

### **Desventajas de la percusión por cable**

- Velocidad de perforación limitada
- Capacidad de perforación limitada
- Falta de control de los caudales que fluyen de las formaciones permeables atravesadas
- Escaso control sobre la estabilidad de los sondeos
- Frecuentes fallos en la sarta de herramientas usadas para perforar
- Necesidad de personal especializado.

### **Ventajas de la perforación a percusión con aire o rotopercusión**

- Alta velocidad de penetración o avance (pozos construidos en un solo día)
- Buena capacidad de alcanzar profundidades grandes
- Buen control del flujo de caudales procedente de los acuíferos cortados o atravesados
- Buen control de la estabilidad de los sondeos
- Permite atravesar formaciones consolidadas y no consolidadas (hasta cierto punto)
- Perjuicios mínimos en las zonas acuíferas
- Rapidez en la instalación del equipo
- Buena toma de muestras (en todo caso, por personal especializado)
- Eficaz identificación de las zonas acuíferas (por personal especializado)

### **Desventajas de la perforación a percusión con aire o rotopercusión**

- Costes medios o altos del equipo
- Costes medios o altos por día de trabajo
- Costes medios del transporte, equipo pesado, torres de perforación sobre camiones

Necesidad de personal experimentado (si se desea tener un buen control técnico de la perforación)

En ciertos casos, se presentan dificultades en el control de los desvíos respecto a la vertical del pozo (dificultades de entubación posterior, y/o en la colocación posterior de la bomba de extracción, tanto más importantes cuanto mayor sea la profundidad del pozo)

## 6. CALIDAD DEL AGUA

En las **zonas húmedas e incluso semiáridas** o con cierto grado de aridez, las aguas subterráneas de las rocas cristalinas y metamórficas suelen tener **residuos secos muy pequeños, inferiores a las 200 a 300 ppm**, dada la poca o muy poca solubilidad de las mismas, siempre que no haya aportes contaminantes externos.

Por el contrario, en las **zonas áridas**, las **aguas subterráneas pueden ser muy salinas**, principalmente por el efecto de la evapotranspiración, y posterior redisolución e infiltración de los compuestos precipitados por aquélla.

Por lo que se refiere a los caracteres microbiológicos, la capacidad de las fisuras, grietas o fracturas de estas rocas para **retener o eliminar gérmenes patógenos es pequeña o muy pequeña**, y si encima se trata de pozos excavados, de poca profundidad, con el nivel próximo a la superficie del terreno, cercanos a posibles y numerosos focos de contaminación (granjas, amplias zonas ganaderas difusas, poblaciones sin sistema de saneamiento eficaz, ríos polucionados, etc.), se entiende que, con frecuencia, en estos acuíferos se hallen **aguas contaminadas bacteriológicamente**.

## 7. TIPOLOGÍA DE LAS CAPTACIONES DE AGUA

Los tipos más usuales de captaciones en estas rocas suelen ser los pozos excavados o abiertos (antiguos), y las galerías horizontales o subhorizontales que drenan por gravedad el agua captada, hacia un punto de salida, también antiguos. Con frecuencia, se encuentra el sistema mixto, es decir, **un pozo abierto con una (o más de una) mina o galería de captación horizontal**, usualmente en el fondo del pozo o sus cercanías, incluso con eventuales ramificaciones, buscando siempre nuevas y sucesivas aportaciones de agua.

De esta manera, actualmente, se consigue además, de obtener un **pequeño caudal de agua, pero suficiente** para satisfacer la demanda, una capacidad de **almacenamiento notable o de reserva para hacer frente a las sequías**, si el caudal de extracción era (y es) pequeño (o muy pequeño) en relación al volumen total de la mina y la zona saturada del pozo.

Si bien son muy comunes en Catalunya, sobretodo en las zonas graníticas y paleozoicas: Se trata de captaciones muy antiguas, generalmente del **siglo pasado (s. XIX) o anteriores**, cuando la tecnología de perforación vertical y de extracción mecánica de agua estaba en mantillas o era muy rudimentaria, los

precios unitarios de los correspondientes trabajos eran muy baratos, con demandas muy pequeñas cuantitativamente, pero muy importantes cualitativamente, etc., etc.

Son conocidas las del **Maresme**, las de la sierra del **Tibidabo** para el abastecimiento antiguo de Barcelona, muchas en las **formaciones miocenas** del Vallès, Penedès, Alt y Baix Camp de Tarragona, etc., etc. Hoy día, muchas de ellas son todavía funcionales, pero el alto coste de su mantenimiento (y la disponibilidad de otros recursos hídricos, obviamente), las hace cada vez menos atractivas para el abastecimiento.

Si bien estas razones económicas y técnicas explican el sistema de galerías o minas horizontales, no debe olvidarse que tipo de captaciones de agua permiten así cortar un mayor número de fracturas o diaclasas verticales o subverticales, que aportan pequeños caudales a través de ellas (pero no siempre de todas las fracturas).

Como un mero valor guía y estadístico, puede aceptarse el valor de 1 litro por segundo y kilómetro de longitud de captación como el rendimiento medio de una galería horizontal en formaciones graníticas (área del Maresme, en Catalunya).

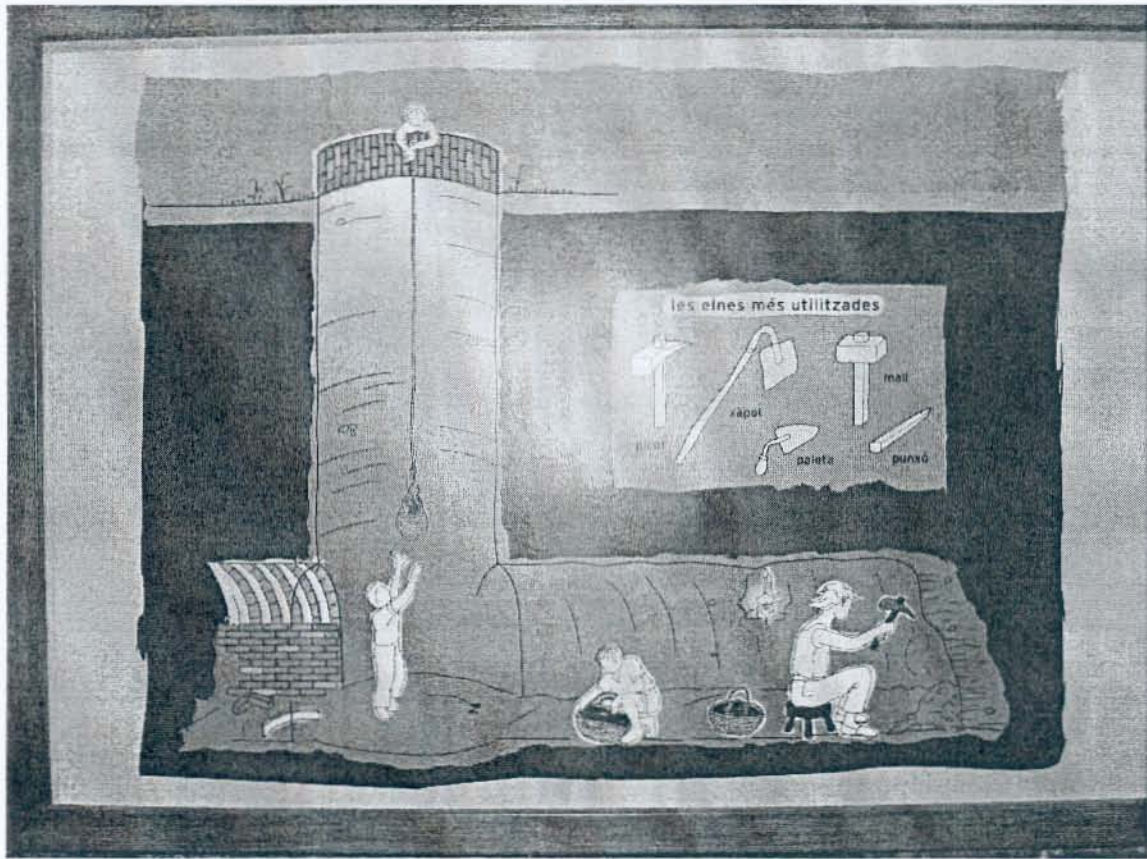
Sin embargo, debe recordarse que, en la actualidad, no se construyen captaciones de este tipo por su altísimo coste, la casi total ausencia de buenos profesionales de la construcción (los denominados **minaires** en Catalunya), la disponibilidad de bombas sumergidas, etc., y predominan, en consecuencia, las perforaciones verticales a rotoperCUSión, ya que se hacen pozos en unas pocas horas, y a unos precios razonables.

Estas técnicas de captación mediante galerías horizontales no son actuales, ya que en la antigua Mesopotamia, ya se utilizaban para la explotación y extracción -por gravedad- de las aguas subterráneas en las zonas de piedemonte, y su posterior aprovechamiento para el riego y el abastecimiento doméstico (los llamados **kanats o ganaths**), de los que ya se habla en la Biblia.

*En la actualidad, las captaciones en estas formaciones ~~son~~ se construyen mayoritariamente mediante perforaciones a rotoperCUSión, habida cuenta de su rapidez y economía. Si se hallan caudales importantes ( $\geq 2-3$  l/s), se pueden ensanchar convenientemente.*

*modificat  
al PC*





ESQUEMA DE LA CONSTRUCCIÓN DE UNA GALERIA HORIZONTAL DE CAPTACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA



POZO PRINCIPAL DE LA MINA VELLA DE VILASSAR, CAUDAL = 8 L/s, NIVEL A UNOS 30 m, DIÁMETRO = 3 m



DETALLE DE UNA DE LAS MINAS DE CONDUCCIÓN DE LA MINA VELLA DE VILASSAR DE MAR, ACTUALMENTE SECA O NO FUNCIONAL, VERANO 2004

## 8. INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Para un hidrogeólogo, aunque sea muy experimentado, se le presentan **pocas tareas más comprometidas que situar adecuadamente un pozo** o captación en estas rocas plutónicas, cristalinas y/o metamórficas, buscando caudales notables de agua subterránea, por ejemplo, más de **1 a 2 litros por segundo**, en régimen continuo, como máximo.

### ANÁLISIS DE LA RED HIDROGRÁFICA

Una buena forma de iniciar los trabajos es **analizar la red hidrográfica**, que en ocasiones viene determinada por la red de fracturación y diaclasación, dando o configurando las zonas más erosionables, por un lado, y por otro, las zonas de mayor densidad de fracturas.

Este tipo de trabajos puede realizarse muy cómodamente con la ayuda de la fotografía aérea o de mapas detallados, a escala 1:5.000, por ejemplo.

En la figura adjunta (fig. 15.16, tomada del libro de Custodio y Llamas, 1976), se da una valoración de los eventuales caudales explotables según la posición del pozo respecto de la red hidrográfica, y que puede resumirse, en un orden de mayor a menor probabilidad de hallar caudales notables de agua:

**Valles (o zonas más profundas)**

**Altiplanicies**

**Laderas**

**Crestas o divisorias de aguas superficiales**

### CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA DE DETALLE

Aunque puede ser de difícil ejecución, sirve también para la **localización de las zonas de fallas o fracturas**, en tanto que estructuras más favorables para una cierta permeabilidad. En general, suele ser aconsejable usar la fotografía aérea, que suele permitir delimitar muy bien las zonas de fractura y diaclasación.

### TÉCNICAS GEOFÍSICAS

Si existe un **buen contraste de los parámetros geofísicos** (resistividad, velocidades sísmicas), puede ser aconsejable realizar campañas de geofísica con el objetivo de hallar o situar la posición del zócalo más resistente con la mayor precisión posible, para así emplazar las nuevas captaciones en las zonas de mayor espesor de materiales alterados.

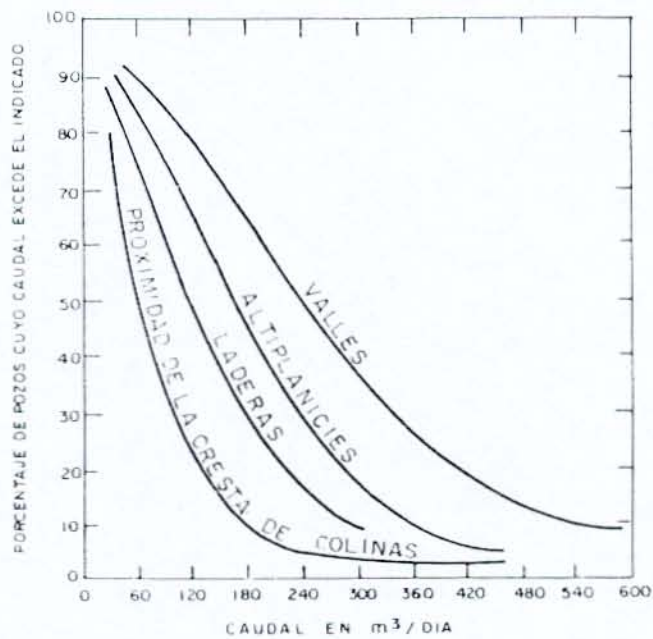


FIGURA 15.16

*Distribución acumulativa de la frecuencia de los caudales de pozos, de acuerdo con su situación topográfica en el área de Stateville (según cita de Legrand, 1954, en Davis y De Wiest, 1966).*

> 17/19

Sin embargo y lamentablemente, **no es posible saber a priori si dicho contraste de los parámetros geofísicos, para cada emplazamiento concreto estudiado, es suficiente para su detección** con los sistemas tradicionales, hasta que estos trabajos se han realizado o iniciado en el campo, con lo cual, con frecuencia, los resultados finales no son lo buenos que caldría esperar, con lo que puede tenerse la falsa impresión que se ha hecho un trabajo inútil.

A este respecto, es preciso no olvidar que estas técnicas de reconocimiento del subsuelo suelen ser tanto más aconsejables cuanto mayor es la zona a estudiar. En otras palabras, intentar investigar adecuadamente el **subsuelo de una parcela de 100 por 100 m mediante sondeos eléctricos o sísmicos, probablemente no conduzca a ninguna conclusión relevante**, por la heterogeneidad y anisotropía de las condiciones del subsuelo, la dificultad de una correcta interpretación de los valores medidos, etc., etc.

En cambio, en estudios para zonas más amplias, donde se puedan hacer series o perfiles eléctricos o sísmicos, la interpretación de los valores obtenidos puede ser mucho mejor, y por lo tanto, de un interés mucho mayor.

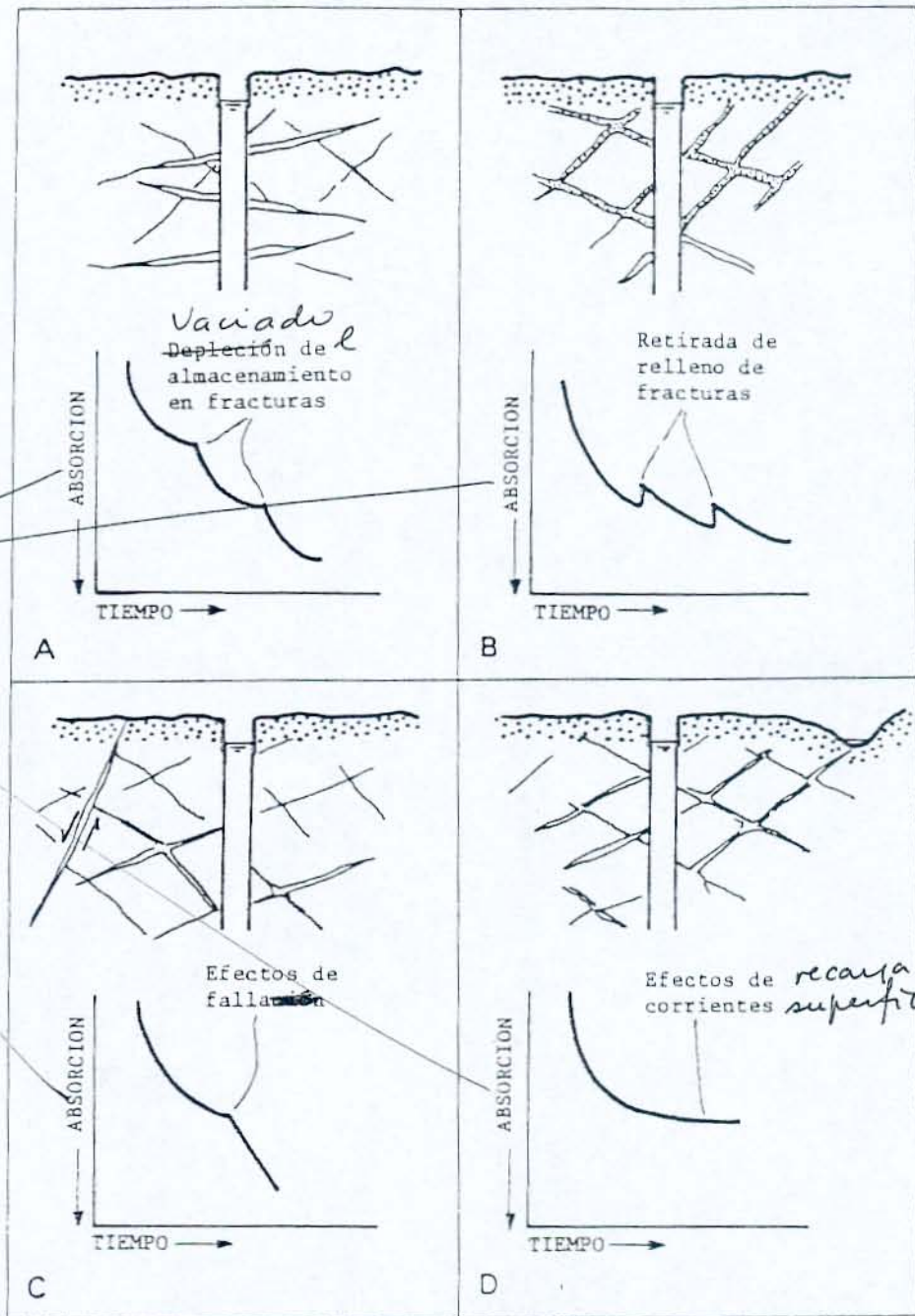
## INVENTARIO DE POZOS Y SONDEOS

Quizá es el **mejor procedimiento para la localización aproximada de las zonas más permeables**, si la densidad de puntos estudiados o existentes es suficiente. No obstante, debe procederse con cautela si los pozos poseen minas o galerías horizontales, los caudales de explotación siempre tienen visos o aspectos poco reales, ya que no tiene ningún significado hidrológico admitir o aceptar que **un pozo es inagotable, si el caudal que se extrae es 100 o 200 litros por hora**, que se bombee a través de una bomba rotativa manual, por ejemplo, aunque para su usuario tenga un carácter vital, o bien la bomba de extracción funciona bajo la demanda de un pequeño depósito, pozos abiertos de gran diámetro pero caudal muy pequeño, etc.

Lo mismo cabe decir de la interpretación de las pruebas de bombeo que se realicen en estos materiales: Siempre el criterio o el sentido común sobre el modelo físico o hidrológico, que debe acercarse lo más posible al real, **debe prevalecer sobre el deseo, las ganas o el apetito hidrológico** de hacer informes con **cifras de la transmisividad y los caudales extraíbles**, que procura siempre obtener rápidamente valores no fiables de la transmisividad, por **generalización de un valor correspondiente a una pequeña grieta de 0,2 m de altura en la vertical de una captación de 60 m de profundidad total**, por ejemplo, u otros errores similares.

Conviene repasar los **esquemas gráficos de la clase 2.5.T.**, a este respecto, así como estudiar también los que se dan en las figuras de las tres páginas siguientes. Siempre es aconsejable representar previamente los datos de los ensayos o pruebas de bombeo en **papel milimetrado aritmético antes que proceder a evaluaciones sofisticadas**, a menudo sin demasiado sentido en estas rocas, y meditar a fondo sobre los datos disponibles y el modelo conceptual del problema.

*descenso*



*descenso en*

Figura 3.3.6.4

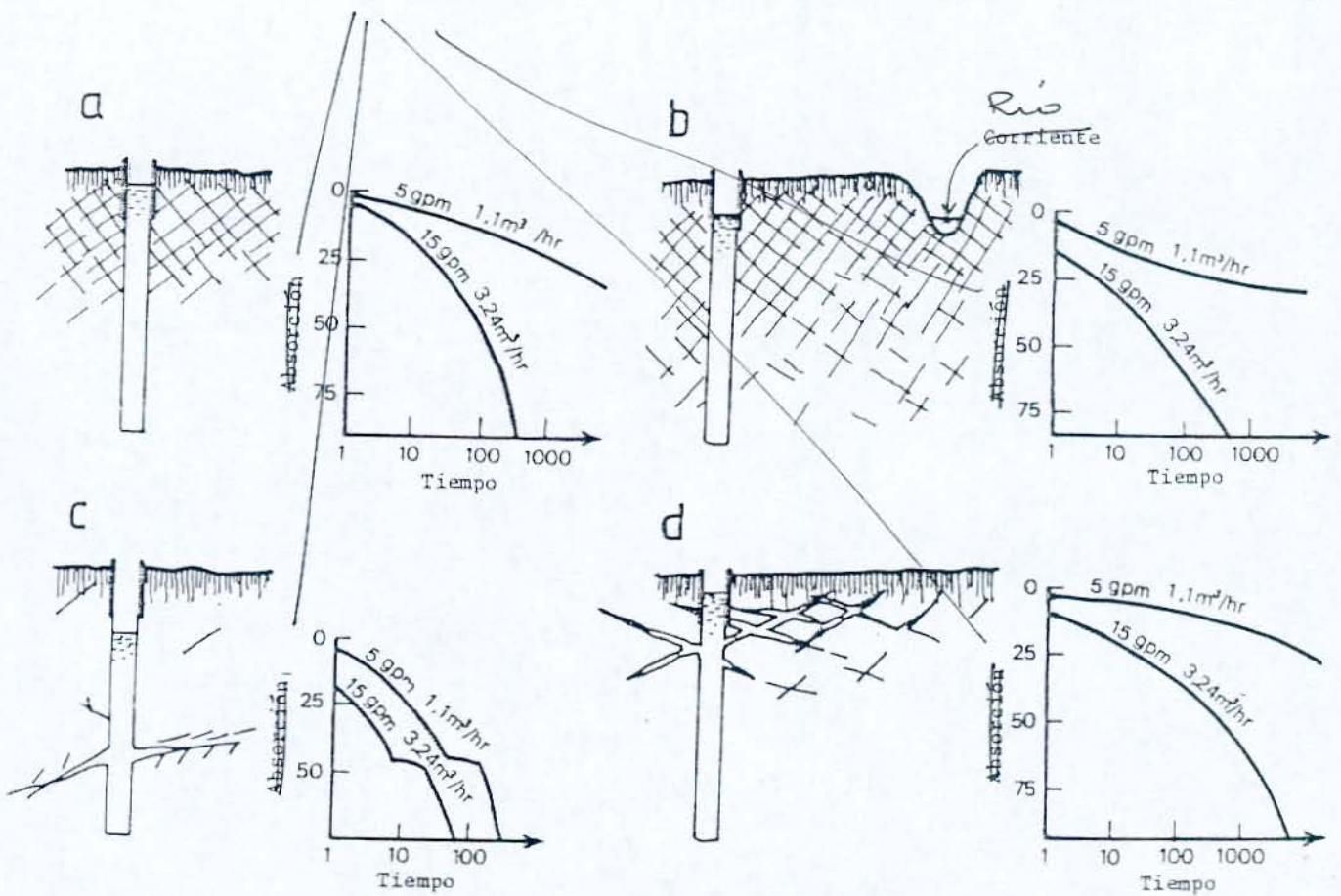
Curvas hipotéticas de absorción de pozos en rocas cristalinas fracturadas que responden a las características de las fracturas y a la estructura local.

- A) Producción en fracturas anchas pero limitadas.
- B) Producción en fracturas anchas rellenas parcialmente de materiales de granulación fina.
- C) Producción en fracturas anchas con zonas de fallas muy juntas como límites impermeables.
- D) Producción en fracturas anchas con un recurso de recarga cercana que proviene de una fuente superficial.

(De Davis y DeWiest, 1.966) (Reproducido con permiso de John Wiley & Sons).

(de Larsson, 1985)

Descenso



descenso vs tiempo

~~Figura 3.3.6.3~~

Curvas de absorción hipotéticas para pozos situados en rocas cristalinas fracturadas, a distintas velocidades de bombeo.  
a) Producción en fracturas pequeñas cercanas a la superficie.  
b) Producción en sistemas de fracturas extensas y abundantes.  
c) Producción en fracturas anchas pero no muy abundantes, que drenan a la roca alterada o terrenos sobreyacentes.  
(Modificado de Davis y DeWiest, 1.966). (de Larsson, 1985)

para distintos caudales

~~Figura 3.3.6.3~~  
~~(de Larsson, 1985)~~

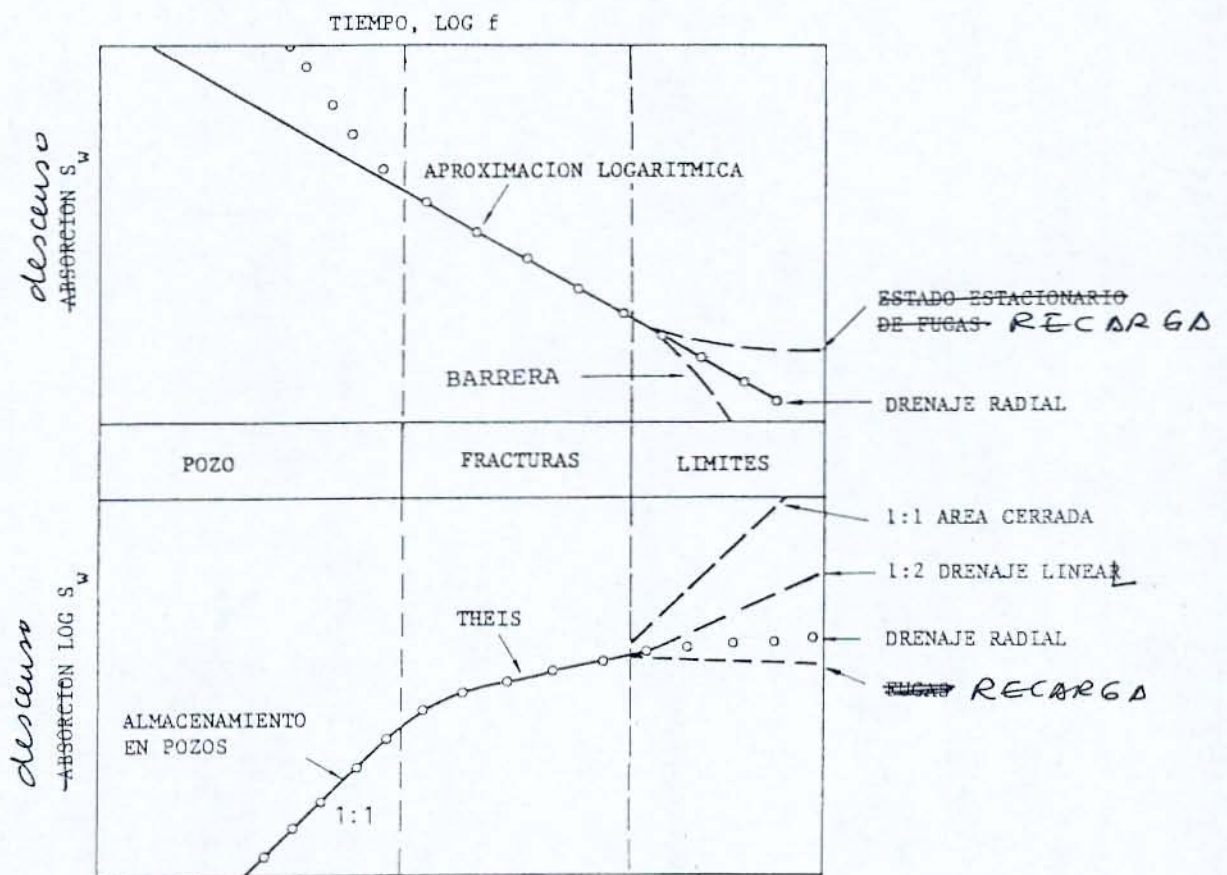


Figura 3.3.6.20 Curvas de datos para diferentes condiciones en los límites.

(de Larsson, 1985)



En general, se recomienda interpretar lo mejor posible, y a la vez, todo el conjunto de datos disponibles para elegir los mejores emplazamientos para futuras captaciones y con un **orden de prioridad lógico (en realidad, hidrogeológico)**. Si es posible, se recomienda determinar o elegir 2 o 3 emplazamientos, para prevenir posibles fallos o fracasos.

*modificar  
al PC*

## 9. DILEMA ENTRE LA CONSTRUCCIÓN DIRECTA DE POZOS O CON SONDEO DE RECONOCIMIENTO PREVIO

En estas formaciones, y en opinión del autor, no cabe plantearse el dilema sobre la construcción directa de un pozo, es decir, sin sondeo de reconocimiento previo, o con él.

En efecto, dada la exigüidad o pequeñez de los caudales que será posible bombear, del orden de algún litro por segundo, en la **inmensa mayoría de las situaciones, para satisfacer pequeñas demandas**, lo más adecuado es proceder a la perforación del pozo directamente en el emplazamiento más idóneo, y por el sistema disponible más aconsejable, de acuerdo con las condiciones del emplazamiento (percusión o rotopercusión).

La perforación previa de un **sondeo de reconocimiento conduce, en estos casos, a una pérdida de tiempo, de recursos económicos**, etc., sobre todo si se considera también que las pequeñas bombas para extraer los escasos caudales citados son fácilmente introducibles verticalmente por los diámetros adoptados para ambos tipos de perforación y entubación (150 a 250 mm).

Por otro lado, si se hace un primer sondeo de reconocimiento, nunca se tendrá la seguridad de tener las mismas condiciones hidrogeológicas en el pozo que se ejecute después, incluso a **unos pocos metros de distancia de aquél**, dadas la **anisotropía y la heterogeneidad de los materiales**, debido a que las fallas y fisuras que aportan agua a la perforación suelen ser predominantemente verticales o subverticales. Ello significa que, aún con unos buenos resultados en el sondeo, no es absolutamente seguro que el pozo, construido posteriormente y a corta distancia de aquél, tenga los mismos buenos resultados que el sondeo previo.

Dicho de otra manera, con **una sola operación de perforación**, se sabrán los **pequeños caudales explotables**, operación que, además, usando la **rotopercusión**, puede realizarse en un corto espacio de tiempo (uno o dos días).

Posteriormente, si los resultados hidrológicos son aceptables, se puede revestir la perforación como pozo de captación definitivo, y proceder a su explotación.

Nota:

La pluma se define como el caudal que pasa por un orificio circular de 0,0058 m de diámetro, con el centro a una profundidad de 0,0464 m, bajo una carga hidráulica de 0,0783 m, una vez estabilizado el nivel del agua.

Es una unidad de caudal, muy común en la Catalunya antigua, con diferentes equivalencias, y tiene diversos múltiplos y submúltiplos. Sus valores varían entre 2.229 l/día en Girona, 2.160 l/día en Lleida, 2.468 l/día en Manresa, 8.400 l/día en Mataró, etc., etc. Hoy día está prácticamente en desuso.

*modificar  
al PC*