

UTILIZACION CONJUNTA DE RECURSOS HIDRAULICOS SUPERFICIALES Y SUBTERRANEOS PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA DE BARCELONA

Conferencia pronunciada en la Universidad de Princeton (EE. UU.) el 20 de noviembre de 1968.

Por M. R. LLAMAS
Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos.
Dr. en Ciencias Geológicas.

Se describen las características geológicas e hidrológicas de los embalses subterráneos explotados para el abastecimiento de agua de Barcelona. Se estudia especialmente la relación entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas. Las aguas subterráneas cubren aproximadamente el 50 por 100 de la demanda actual de agua, que es del orden de 500 Hm.³ al año. Se exponen brevemente los problemas presentes y futuros, como la escasez de recursos y la polución de las aguas, las cuestiones legales y las educativas. Finalmente se describe el plan de operaciones para resolver o evitar dichos problemas. Este plan incluye el uso combinado de embalses superficiales y subterráneos para regular los recursos hidráulicos de la cuenca.

1. Introducción.

Mi intención es exponer brevemente cuáles son las características hidrogeológicas de los acuíferos que se utilizan para atender a la demanda de agua de la zona metropolitana de la ciudad de Barcelona y su relación con las aguas de los ríos y del mar.

Veremos después rápidamente cuáles son los problemas principales que plantea el abastecimiento de agua en dicha zona y, por último, someteré a su consideración el plan de operaciones que tenemos previsto para resolver esos problemas.

Lo que expondré es, en su mayor parte, un resumen de diversos informes conjuntamente realizados por ingenieros y geólogos de dos agencias del Ministerio de Obras Públicas de España, la Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental y el Servicio Geológico de Obras Públicas.

Algunos aspectos parciales de estos trabajos han sido objeto de diversas comunicaciones científicas publicadas en distintas revistas especializadas. El inicio de estos trabajos tuvo lugar hace unos cuatro años, y se calcula que serán necesarios todavía tres o cuatro años más para dejar el problema encajado definitivamente,

desde el punto de vista técnico, jurídico, político y económico.

2. Características geográficas, geológicas y climáticas generales.

La zona metropolitana de Barcelona tiene actualmente casi tres millones de habitantes, es el núcleo urbano más importante de la costa mediterránea, la segunda ciudad de España en número de habitantes y el primer centro industrial del país. Como es lógico, estos hechos dan lugar a una fuerte demanda de agua que ha originado los consiguientes problemas, ya que los recursos hidráulicos son escasos.

Las aguas superficiales, según la ley española, son un bien de dominio público, cuya administración corresponde al Gobierno. Las aguas subterráneas son, en general, un bien privado, cuyo dominio corresponde al propietario del suelo. Para la administración de los recursos hidráulicos superficiales, la España peninsular está dividida en diez regiones, cuyos límites coinciden con los de la cuenca hidrográfica de un río importante o de varios grupos de ríos más pequeños. La ciudad de Barcelona está situada en la cuenca del Pirineo Oriental, que

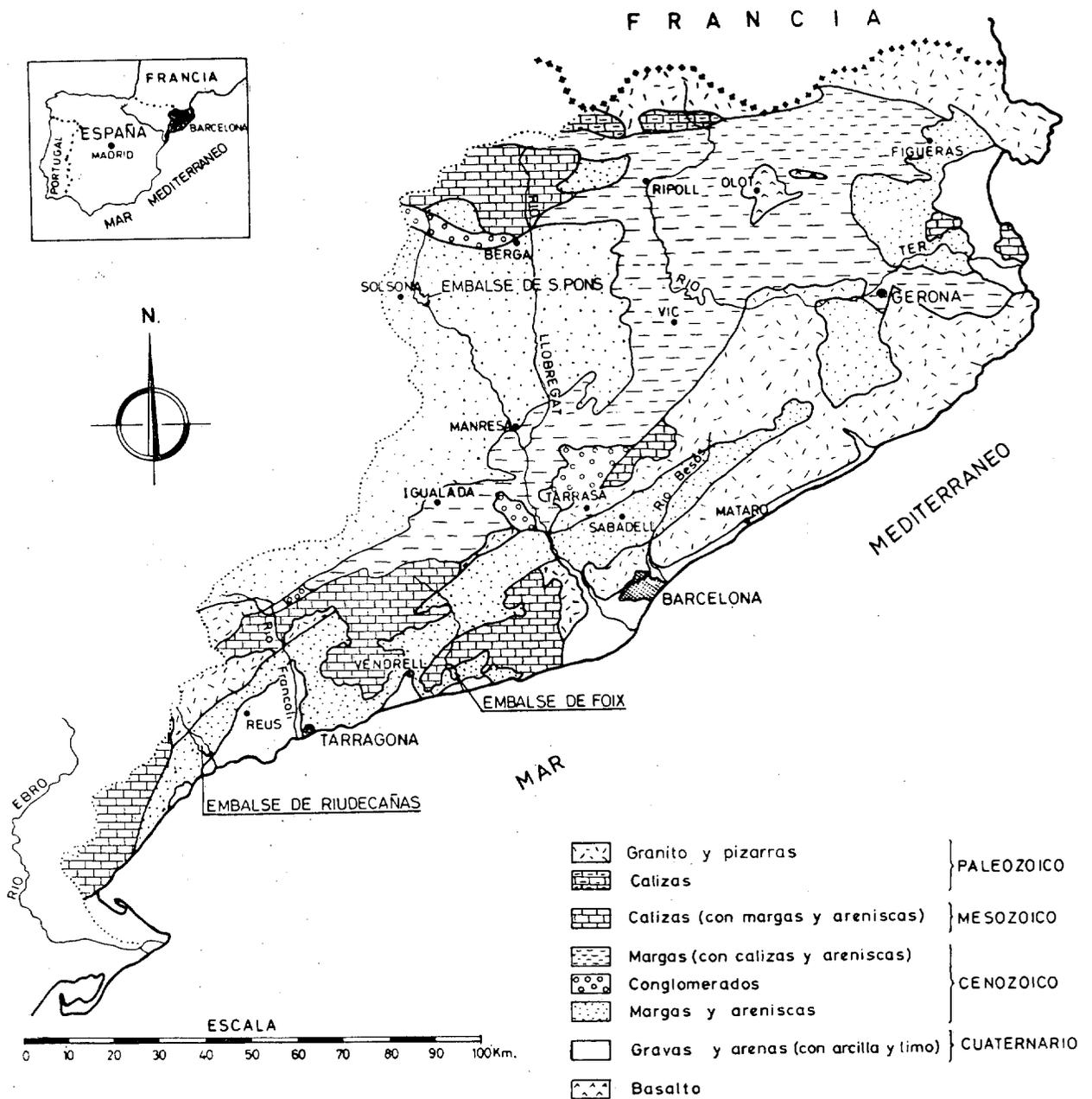


Fig. 1. — Litología de la cuenca del Pirineo Oriental.

comprende todos los ríos que desembocan en el mar Mediterráneo desde la frontera francesa hasta la desembocadura del río Ebro, que es el río más importante de nuestro país.

La cuenca del Pirineo Oriental tiene una extensión de 16,550 Km.²; en la figura número 1 puede verse un esquema de su composición litológica que vamos a describir brevemente, ya que el problema del abastecimiento de agua de Barcelona es inseparable del estudio de recur-

sos hidráulicos de toda la cuenca del Pirineo Oriental.

En la zona norte de la cuenca encontramos la zona oriental de los Pirineos con alturas máximas de unos 2 500 m. Los materiales que forman esta cadena montañosa en la zona axial son granitos paleozoicos y pizarras silúricas con excepción de una zona de calizas devónicas. Paralelamente a la zona axial se disponen varias sierras de altitud decreciente que originan

el Prepirineo y que están formadas por materiales mesozoicos (predominantemente calcáreos) y terciarios (predominantemente arcillosos).

Paralelo a la costa tenemos el Sistema Mediterráneo, con alturas que alcanzan los 1 600 metros, en el que se distinguen cuatro unidades claramente definidas: a) La Cordillera Prelitoral; b) La Depresión Prelitoral; c) La Cordillera Litoral, y d) La Depresión Litoral. Las dos cordilleras están formadas por un zócalo de granito y pizarras paleozoicas cubierto en muchas zonas por materiales secundarios predominantemente calcáreos. La Depresión Prelitoral está constituida por una fosa tectónica rellena de materiales miocénicos y cuaternarios. Por último tenemos la plataforma costera o Depresión Litoral, formada por una base de terrenos del Terciario Superior, cubiertos en gran parte

por los materiales deltaicos de los ríos Besós y Llobregat. Esta última zona es la de mayor interés para nuestro estudio.

Entre el Sistema Mediterráneo y los Pirineos se extiende la Depresión Central Catalana, formada por depósitos terciarios análogos a los de las depresiones ya citadas; es decir, por areniscas y margas.

El clima se presenta dentro de la propia cuenca del Pirineo Oriental con ciertas variaciones debidas a su topografía y a su situación geográfica. Desde el punto de vista de nuestro estudio es suficiente recordar que la pluviometría media del conjunto de la cuenca es de 740 milímetros, con variaciones geográficas de 400 a 200 milímetros. Las épocas más lluviosas son la primavera y el otoño. La temperatura media anual oscila entre 16° C. en la zona litoral y 9° C. en la zona de alta montaña.

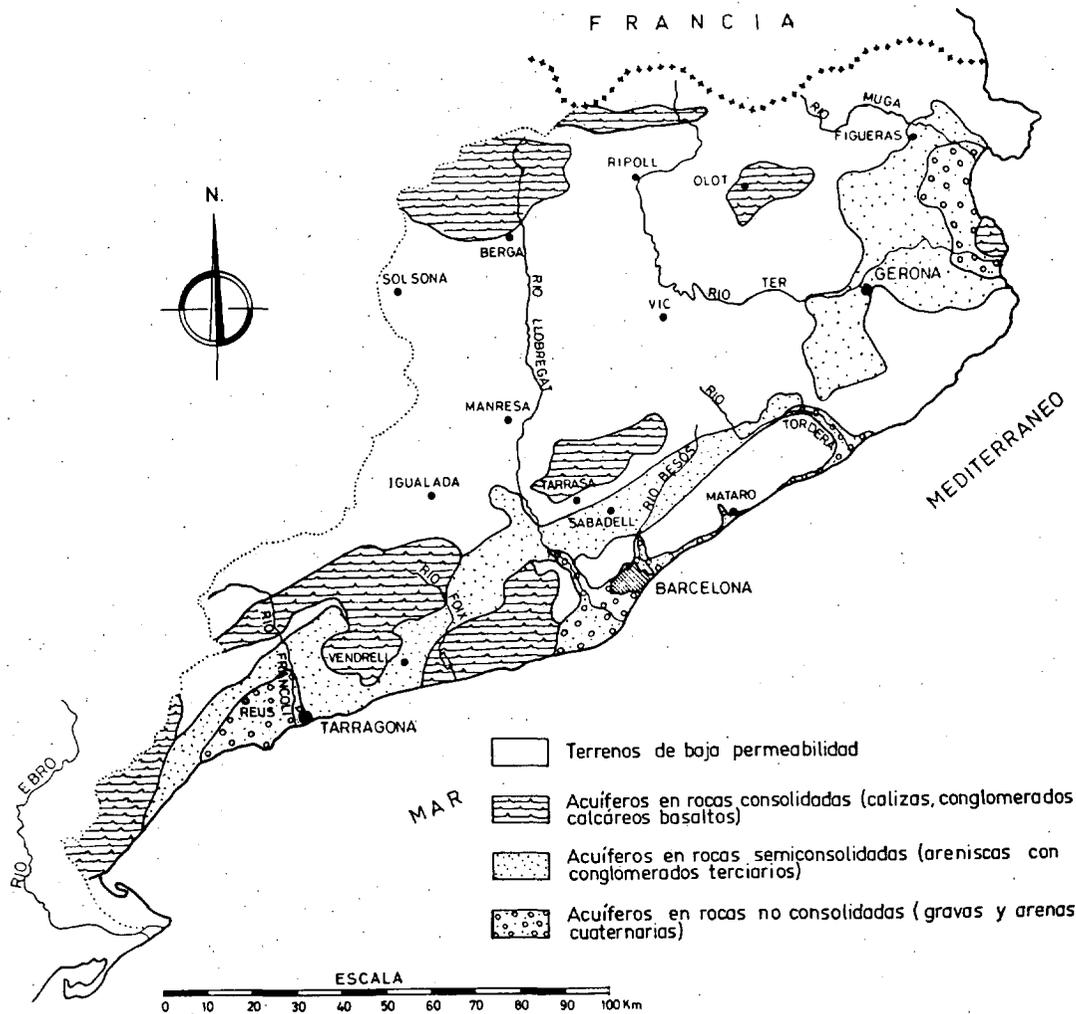


Fig. 2. Acuíferos principales de la cuenca del Pirineo Oriental.

3. Los embalses subterráneos.

En la figura número 2 se han representado, también de modo esquemático, las principales formaciones geológicas de la cuenca del Pirineo Oriental, que pueden considerarse como acuíferos o embalses subterráneos. Algunos de ellos, como son especialmente los que corresponden a rocas consolidadas, han sido todavía poco explotados mediante pozos, pero otros son objeto de una intensa explotación como es el caso de los acuíferos de los aluviones cuaternarios de las zonas bajas de los ríos Llobregat, Besós y Tordera. En todo lo que a continuación vamos a hablar nos referimos casi exclusivamente a dichos acuíferos del Besós y del Llobregat, y especialmente a este último, ya que es bastante más importante que el anterior, tanto por su capacidad de embalse como por estar en gran parte alimentado por el propio río Llobregat, cuyo caudal (610 Hm.³/año) es unas diez veces superior al del río Besós.

3.1. Método de estudio.

El estudio está siendo realizado por un equipo de cuatro ingenieros y dos geólogos del Ministerio de Obras Públicas, cada uno de los cuales se ocupa más especialmente de un determinado campo (Hidrología de Superficie, Climatología, Geología, Hidrología Subterránea, Hidroquímica, etc.). Algunas de las tareas más específicas realizadas hasta mayo de 1968 son las siguientes:

- a) Cartografía geológica de toda la zona a escala 1/25 000, y de zonas especiales a escala 1/10 000 ó 1/5 000.
- b) Doscientos cincuenta sondeos geoelectrónicos en el delta del Llobregat.
- c) Cuatro mil metros de perforación repartidos en 70 sondeos para investigación de la geología de subsuperficie.
- d) Instalación de 110 tubos piezométricos, en los que se mide el nivel del agua quincenalmente. En siete de ellos hay instalados limnigrafos.
- e) Inventario de pozos y sondeos de investigación. Se han inventariado algo más de 1 000 pozos, y se han recopilado datos de oscilaciones de nivel que en algún caso llegan a tener cuarenta años de continuidad con medida de nivel diario.
- f) Toma de muestras para análisis químicos y registros de salinidad en los tubos piezométricos.

Se analizó además el contenido en tritio (H_3) de 14 muestras con objeto de intentar la datación de las aguas. Se han conseguido también datos sobre la variación de la calidad química del agua en algunos pozos y en el río durante más de cuarenta años.

g) Varios ensayos de bombeo y medidas de velocidad de descenso del agua en todos los tubos piezométricos instalados por nosotros, con lo que se ha podido obtener una buena panorámica de la conductividad hidráulica del acuífero.

La elaboración de todos estos datos, junto con los que ya se venían obteniendo anteriormente sobre los caudales del río Llobregat, lluvias y temperaturas, nos ha permitido llegar al modelo conceptual del acuífero del Llobregat que vamos a exponer a continuación.

3.2. Características geométricas y litológicas de los embalses subterráneos próximos a Barcelona.

En la figura número 3 se indica la situación de los cinco embalses o unidades hidrogeológicas independientes que originan los depósitos fluviales del Besós y del Llobregat. La separación entre las distintas unidades se debe a la existencia de dos estrechos en el valle del Llobregat.

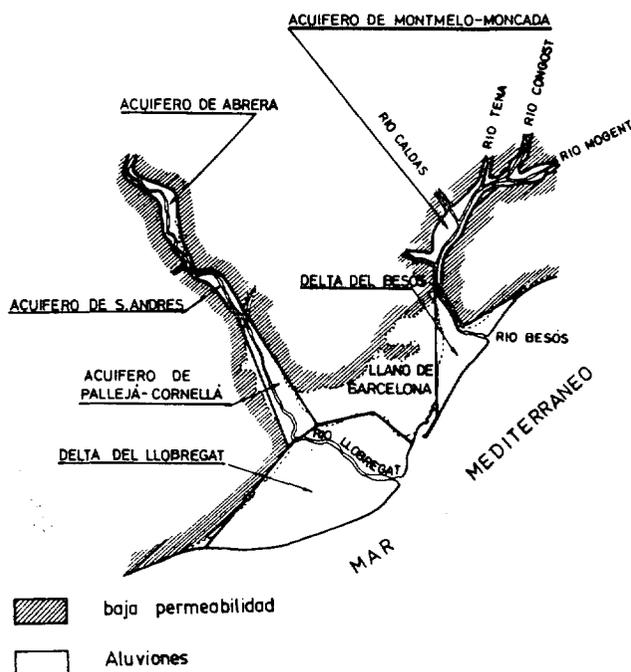


Fig. 3. — Unidades hidrogeológicas.

bregat y uno en el del Besós, formados por pizarras silúricas impermeables. Debajo de la propia ciudad de Barcelona existen también algunas capas acuíferas de menor importancia (areniscas terciarias principalmente), que son también activamente explotadas sobre todo para refrigeración de edificios, y cuya recarga procede de las filtraciones de la red de alcantarillado de la ciudad.

En la figura número 4 pueden verse los per-

meables; solamente en algunas zonas reducidas existen areniscas y gravas terciarias, que pueden ser consideradas como materiales permeables.

3.3. Parámetros hidrológicos.

La elevada transmisibilidad de los acuíferos es una de las razones que explican el elevado número de pozos construidos en la zona. Con

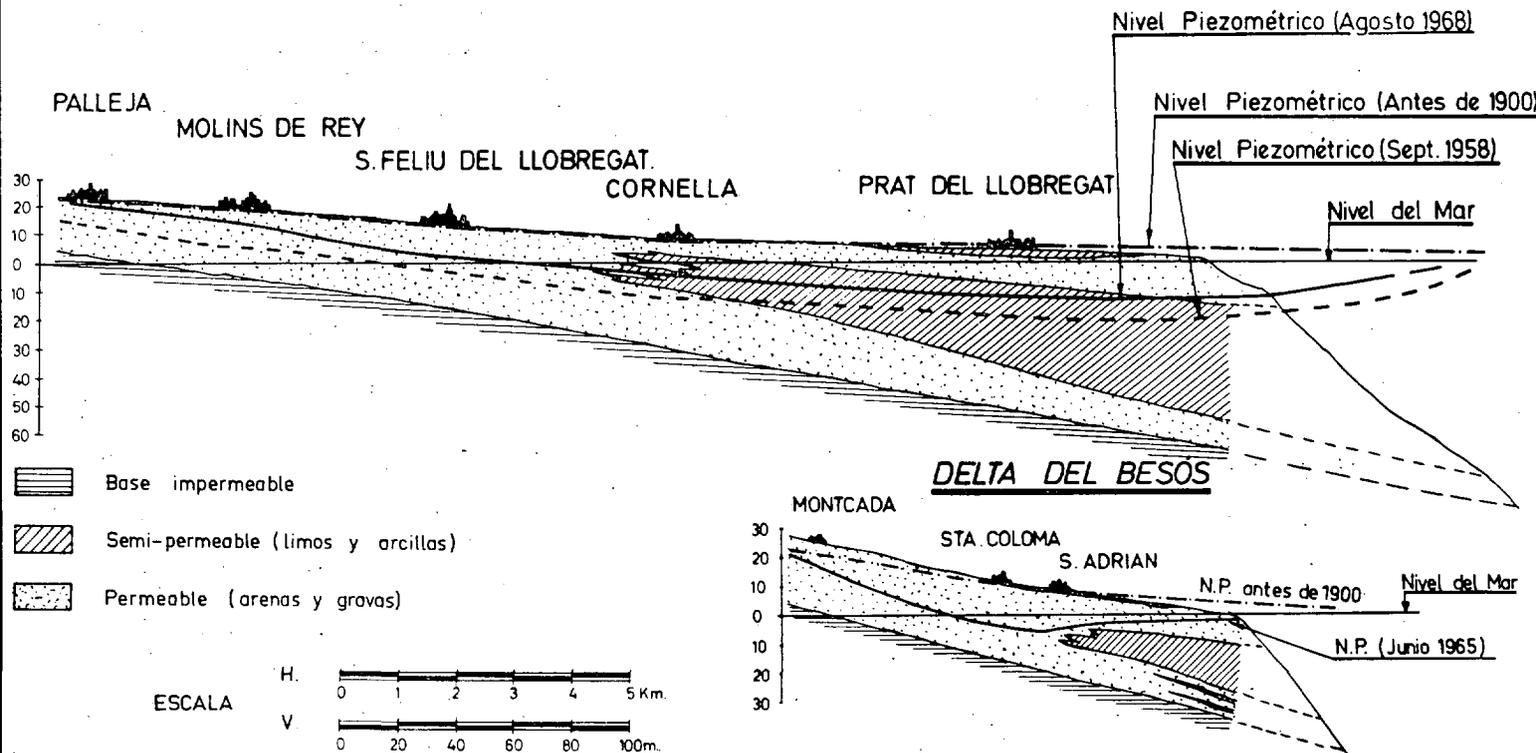


Fig. 4. — Perfiles esquemáticos de los deltas del Llobregat y Besós.

files geológicos esquemáticos de los deltas de los ríos Besós y Llobregat. Ambos deltas presentan una estructura muy similar; están constituidos en la zona de aguas arriba por un solo nivel de gravas y arenas que hacia aguas abajo se separa en dos, debido a la interposición de una capa de limos y arcillas arenosas, cuyo espesor aumenta en dirección hacia el mar. Hacia las zonas marginales de ambos deltas, la capa de limos y arcillas se adelgaza, y las dos capas de gravas se unen.

La base de los materiales cuaternarios está constituida, según las zonas, por granitos, pizarras silúricas o margas terciarias, todos ellos materiales que pueden ser considerados como im-

base en los datos obtenidos en el inventario sobre la capacidad específica de los pozos y en los ensayos realizados directamente en los piezómetros se han estimado unos valores de la transmisibilidad en los acuíferos profundos de ambos deltas, que nos han permitido obtener una buena idea de su variación. En la figura número 5 puede verse la distribución de las líneas de isotransmisibilidad en el acuífero principal del delta del Llobregat. Puede verse que en la zona central del delta se alcanzan transmisibilidades superiores a 5 000 m.²/día.

Los ensayos de bombeo parecen indicar también con bastante claridad que se trata de un acuífero semiconfinado. El coeficiente de per-

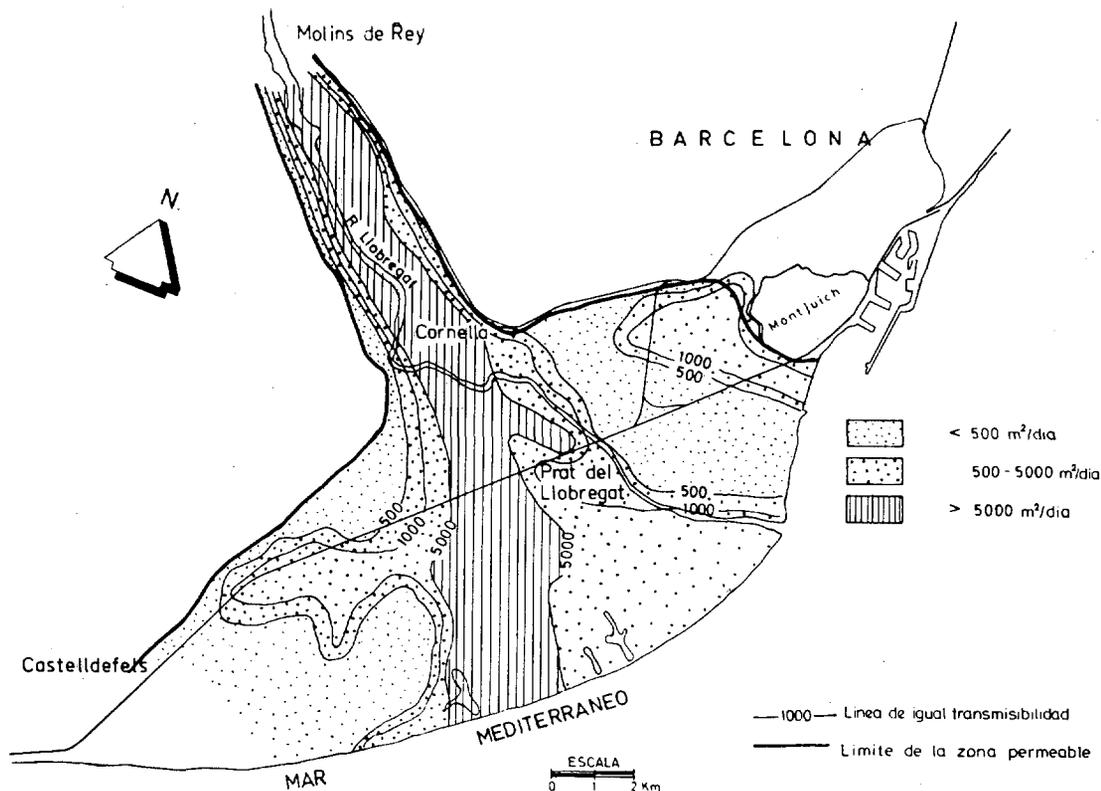


Fig. 5.— Mapa de transmisibilidad del acuífero libre de Pallejá-Cornellá y del acuífero profundo del delta del Llobregat (según Galofré, 1965).

meabilidad del acuitardo, formado por la capa de limos que separa el acuífero superior del inferior, parece tener una permeabilidad que oscila entre 10^{-2} y 10^{-3} m./día. No obstante, es muy probable que existan considerables desviaciones de este valor medio (Custodio, 1967).

En lo que se refiere al coeficiente de almacenamiento o porosidad eficaz de los acuíferos freáticos no disponemos de datos directos. En el caso del delta del Llobregat, el estudio de las variaciones del nivel piezométrico, en relación con el volumen bombeado en épocas de recarga mínima, parece indicar que la porosidad eficaz media de la zona superior del acuífero oscila entre 0,2 y 0,3 (Llamas, 1967). El volumen total de agua dulce contenida en el embalse subterráneo del Llobregat es del orden de $1\ 000\ \text{Hm}^3$, y en el delta del Besós del orden de $100\ \text{Hm}^3$.

3.4. Funcionamiento del embalse subterráneo: recarga y descarga.

El conocimiento de la geología, conjunta-

mente con el estudio de los datos de las variaciones de los niveles piezométricos del embalse subterráneo en el espacio y en el tiempo, nos permite tener ya una imagen del sistema de recarga y descarga del acuífero que en sus líneas generales consideramos aceptable.

En las figuras 6-a y 6-b pueden verse los mapas de isopiezas correspondientes a los acuíferos profundo y superficial del delta del Llobregat el sábado, día 1 de abril de 1967; es decir, después de una semana de trabajo normal en las fábricas. Las medidas tomadas al final de días festivos — es decir, cuando muchos pozos de las fábricas han estado parados — indican que el nivel piezométrico está entonces algo más alto en las zonas de bombeo más importantes, pero apenas cambia la configuración general del flujo del agua subterránea (Custodio, 1967).

La observación de ambos planos nos indica que los dos acuíferos del delta enlazan hidráulicamente con el acuífero único de la zona Pallejá-Cornellá (ver también figura número 4), y también que en la zona occidental del delta, la conexión hidráulica entre el acuífero superior e

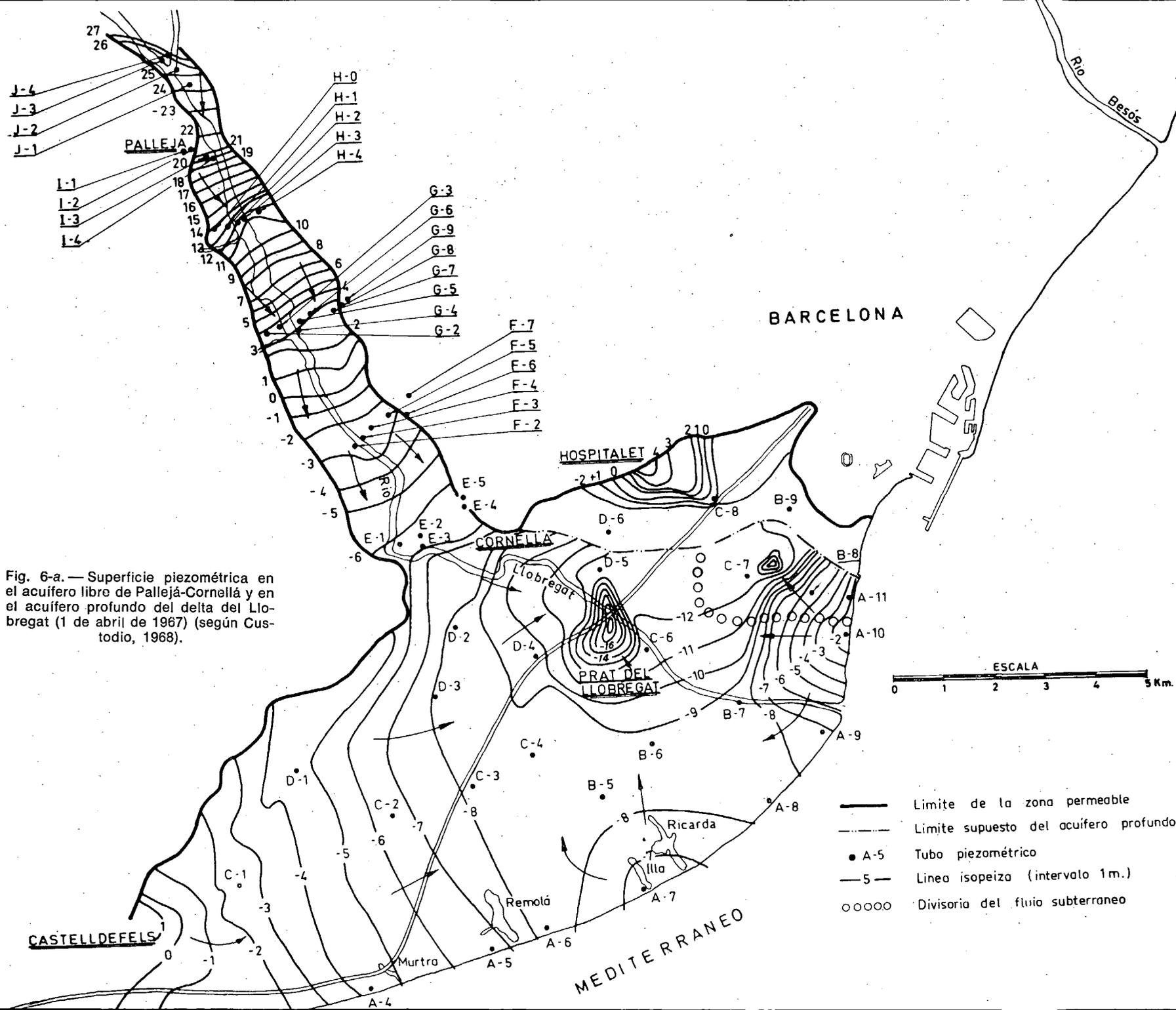


Fig. 6-a.— Superficie piezométrica en el acuífero libre de Pallejá-Cornellà y en el acuífero profundo del delta del Llobregat (1 de abril de 1967) (según Custodio, 1968).

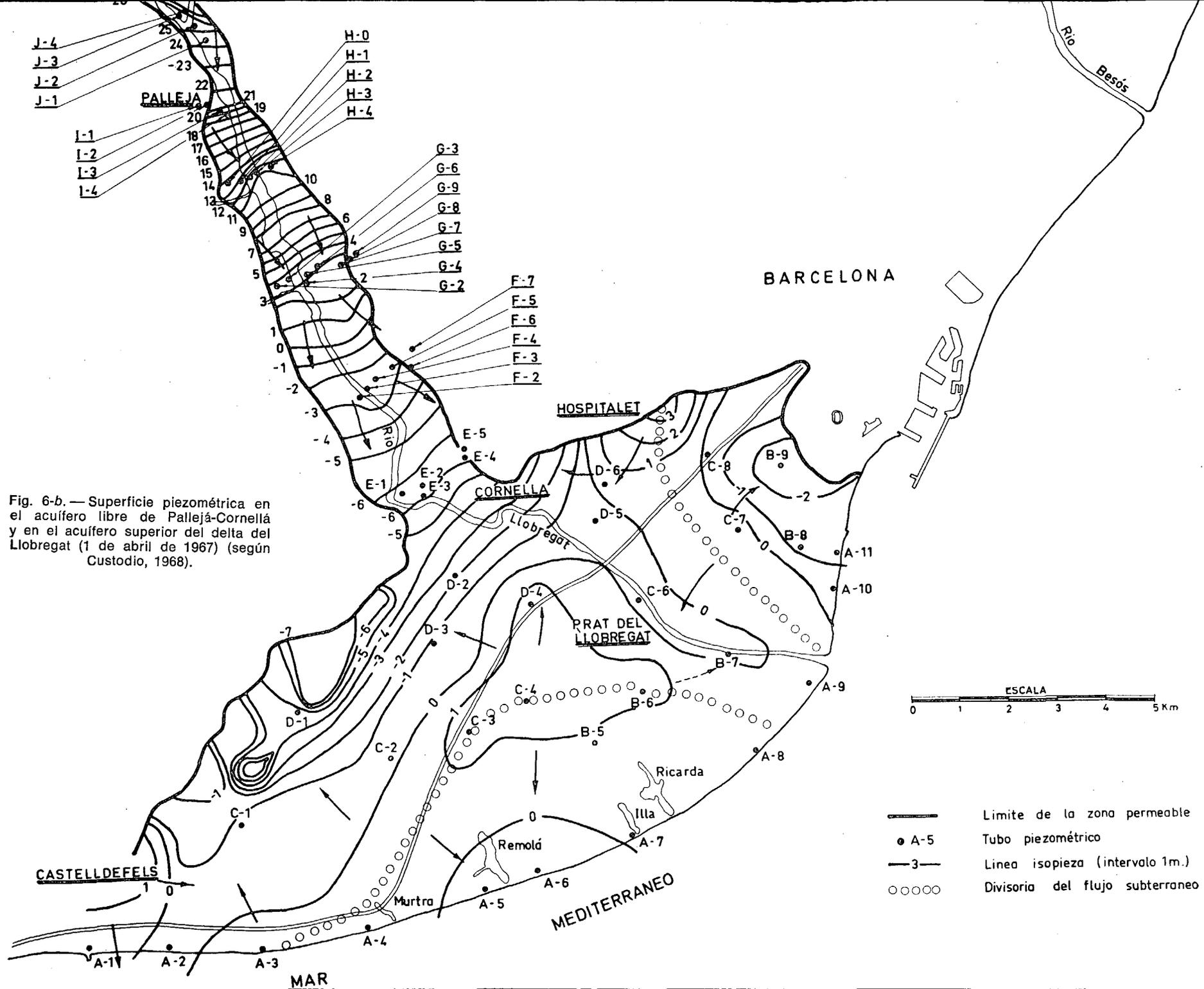


Fig. 6-b. — Superficie piezométrica en el acuífero libre de Pallejá-Cornellá y en el acuífero superior del delta del Llobregat (1 de abril de 1967) (según Custodio, 1968).

- ESCALA
0 1 2 3 4 5 Km
- Límite de la zona permeable
 - A-5 Tubo piezométrico
 - 3 — Línea isopieza (intervalo 1m.)
 - ○ ○ ○ Divisoria del flujo subterráneo

inferior es grande, como ya era de esperar por los datos geológicos de los sondeos.

El acuífero profundo tiene siempre un nivel piezométrico inferior al del acuífero superficial con diferencias de nivel a veces superiores a 15 m. Esta diferencia de potencial produce un flujo de agua del acuífero superior al inferior. Este flujo ha sido estimado por distintos procedimientos (Llomas, Vilaró y Custodio, 1967), obteniéndose cifras que oscilan entre 30 y 60 Hm.³/año.

Las oscilaciones de nivel son, por lo general, pequeñas en el acuífero superficial, al contrario de lo que ocurre en el profundo y en el de Cornellá-Pallejá, donde desde el principio de siglo se han constatado oscilaciones superiores a 25 m.; por ejemplo, en el Prat (fig. núm. 4), los pozos eran artesianos con cota de + 7 me-

tros a principio de siglo, y, sin embargo, llegaron a la cota — 20 m. en 1958. Ambas cotas referidas al nivel del mar.

En la figura número 7 puede verse el hidrograma de tres pozos de observación; el paralelismo en las oscilaciones de los niveles nos indica que se trata de un acuífero que funciona como una unidad hidrogeológica. Los cambios de nivel se deben al juego de la recarga y de la descarga. Para el estudio de la influencia de los diversos factores se han ensayado diversos procedimientos, cuyos resultados, *grosso modo*, coinciden.

Un primer procedimiento fue el estudio de la subida de los niveles piezométricos en relación con los caudales del río Llobregat y de los descensos en relación con los volúmenes de agua bombeada. En la figura número 8 se repro-

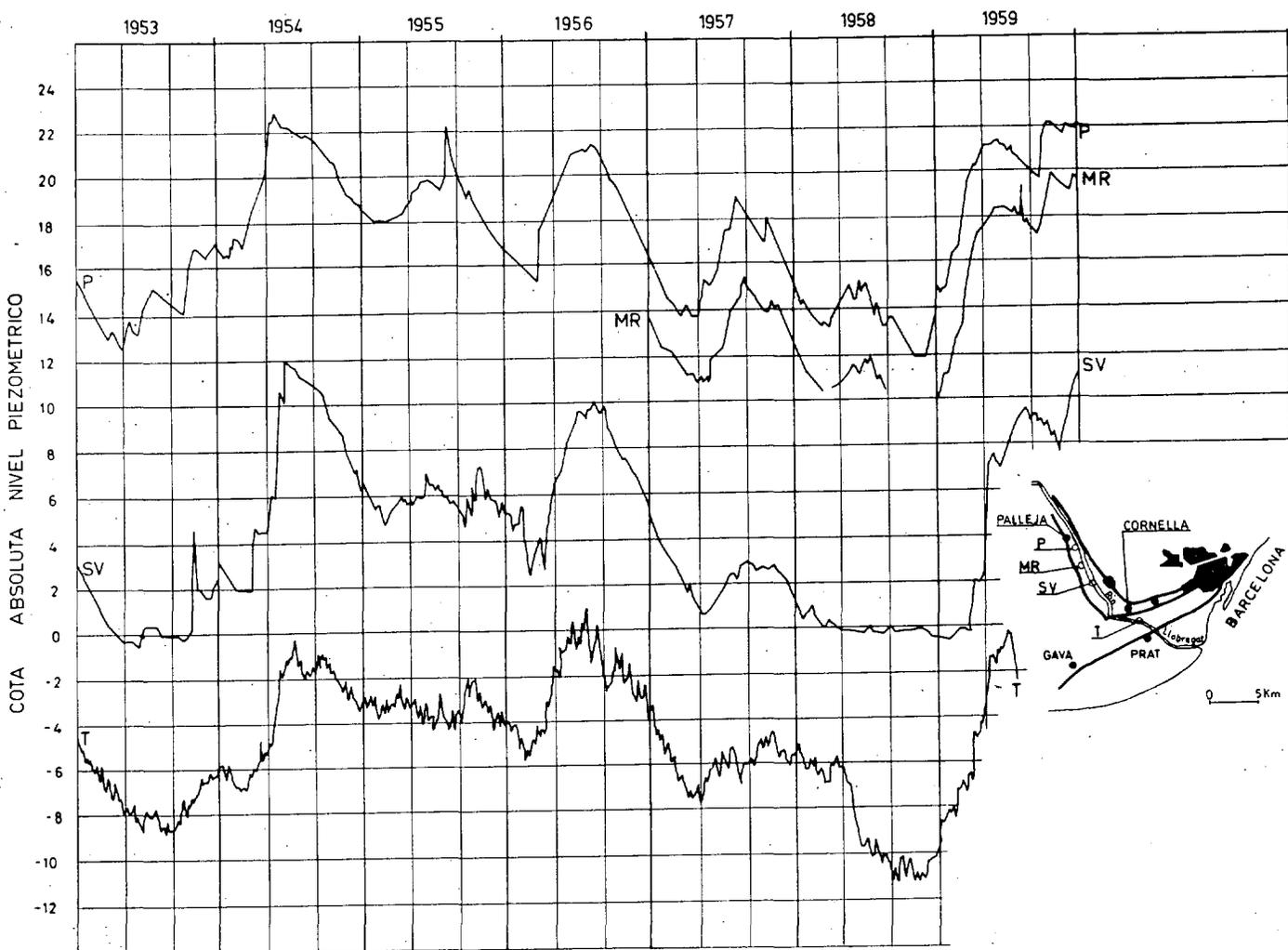


Fig. 7. — Cambios de nivel en cuatro tubos piezométricos del acuífero de Cornellá-Pallejá.

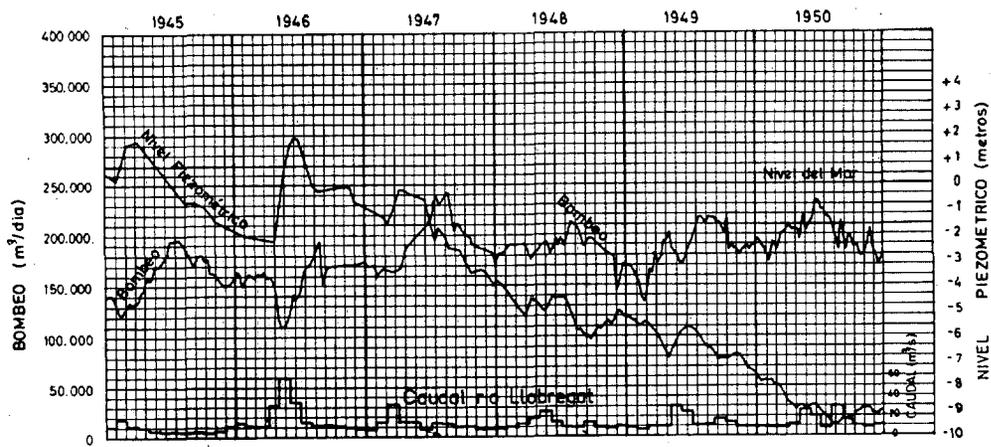


Fig. 8. — Nivel piezométrico en Cornellá. Bombeo para el abastecimiento de Barcelona y caudal medio mensual del río Llobregat.

ducen los datos correspondientes a los años 1945 a 1950.

Este estudio nos llevó a la conclusión de que la recarga del río se efectúa primordialmente durante los períodos de avenidas, en los que la recarga puede alcanzar valores de un millón de metros cúbicos por día. El estudio de los descensos con los bombeos nos llevó a la conclusión de que la cantidad de agua desalojada del acuífero, cuando se provoca un descenso general del orden de un metro, es del orden de unos 10 millones de metros cúbicos.

Con objeto de valorar del modo más adecuado la relación entre las aguas superficiales

y las subterráneas se decidió efectuar un balance hídrico total de la zona (Vilaró, 1967; Vilaró y Martín, 1968), cuyos resultados resumidos en el cuadro adjunto y en la figura número 9. Es conveniente tener en cuenta que en dicho cuadro no todos los valores tienen el mismo grado de exactitud.

Datos medidos directamente: PZ 1, ALL, RC, PMC, B.

Datos calculados mediante fórmulas: ER, REC, IPZ 1, PMS.

Datos estimados: EZ 3, EZZ, RS, IEZ 2.

Datos calculados por diferencia de otros valores del cuadro:

$$a) IC = RC - REC - PMC.$$

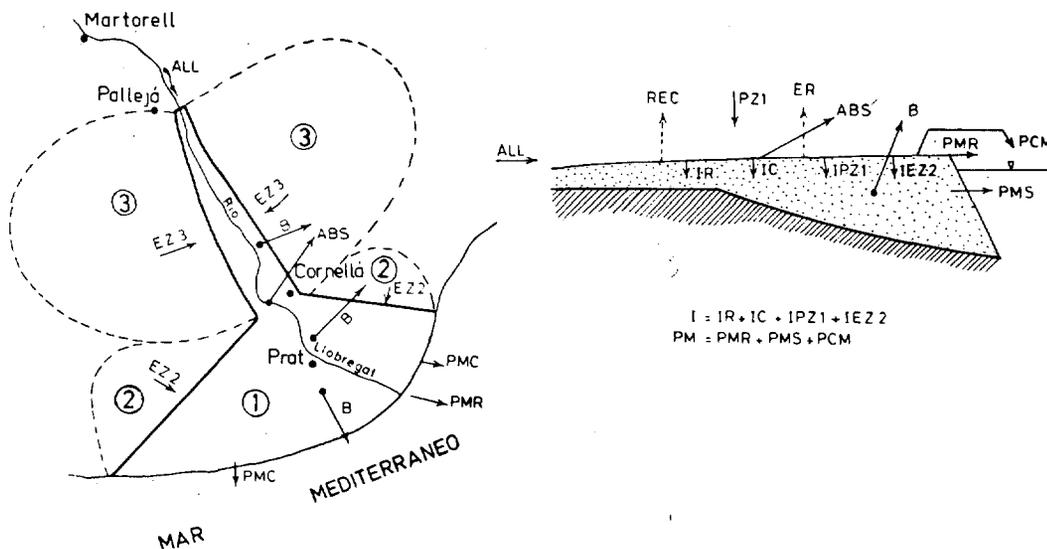


Fig. 9-a. — Elementos para el balance hidráulico del delta del Llobregat.

Balance hidrico del bajo Llobregat.

AÑO	PZ1	+ ALL	+ EZ3	+ EZ2	+ RS	= TOTAL
58-59	87'10	919'70	44'40	10'40	1'80	1.063'50
59-60	59'10	1.276'50	22'70	5'30	5'70	1.369'30
60-61	59'00	527'66	22'50	5'25	5'70	620'11
61-62	73'90	698'05	28'00	6'60	5'70	812'25
62-63	139'00	1.232'05	88'50	20'70	0'00	1.480'25
63-64	56'00	907'00	21'50	5'00	5'70	995'20
64-65	36'10	411'00	8'90	2'10	5'70	463'80
65-66	67'47	851'70	25'94	7'29	5'77	958'17
66-67	40'31	351'19	10'33	2'90	5'77	410'50

AÑO	RC	+ ABS	+ ER	+ IR	+ PMR	+ IPZ1	+ IEZ2	= TOTAL
58-59	146'20	61'04	52'00	167'00	590'00	36'90	10'40	1.063'50
59-60	146'20	59'36	50'00	80'04	1.013'60	14'80	5'30	1.369'30
60-61	132'00	69'64	50'00	19'00	329'50	14'70	5'25	620'11
61-62	132'00	79'80	50'00	32'75	481'50	29'60	6'60	812'25
62-63	146'20	98'00	60'00	99'35	977'00	79'00	20'70	1.480'25
63-64	146'20	133'30	45'00	101'00	548'00	16'70	5'00	995'20
64-65	109'30	122'20	32'50	7'30	181'10	9'30	2'10	463'80
65-66	104'63	144'20	40'42	57'27	571'53	32'83	7'29	958'17
66-67	102'92	119'01	41'09	82'13	57'45	5'00	2'90	410'50

AÑO	REC	+ IC	+ PMC
58-59	13'40	21'60	111'20
59-60	13'20	20'00	113'00
60-61	13'20	20'00	98'80
61-62	13'20	20'00	98'80
62-63	10'00	20'00	116'20
63-64	13'20	20'00	113'00
64-65	17'80	15'90	71'60
65-66	18'60	36'03	50'00
66-67	11'90	41'02	50'00

AÑO	B	+ VR	+ PMS
58-59	78'00	+ 127'90	30'00
59-60	76'00	+ 2'70	30'00
60-61	95'00	- 51'03	15'00
61-62	100'00	- 26'05	15'00
62-63	100'00	84'05	35'00
63-64	95'00	7'70	50'00
64-65	123'20	- 94'60	10'00
65-66	125'73	- 2'71	10'40
66-67	140'48	- 19'83	10'40

PM
731'20
1.156'60
443'30
595'30
1.128'00
711'00
62'70
631'93
117'85

I
235'90
120'14
58'95
88'95
219'05
142'70
38'60
133'42
131'05

PZ 1: Pluviometría sobre el embalse subterráneo. ALL: Aportación del río Llobregat en Martorell. EZ 3: Aportación de rieras que desembocan en el río Llobregat aguas abajo de la estación de Martorell. EZ 2: Aportación de rieras que desembocan y se infiltran en el delta. RS: Reserva del suelo. ER: Evapotranspiración real. RC: Volumen anual derivado del río Llobregat por los dos canales. Este volumen se distribuye en los componentes REC + IC + PMC. ABS: Volumen anual derivado del río Llobregat para el abastecimiento de Barcelona. PMR: Volumen anual que se pierde en el mar en la desembocadura del río Llobregat. IR: Volumen anual que se infiltra desde el río Llobregat en el embalse subterráneo. IEZ 2: Volumen anual que se infiltra en el embalse subterráneo procedente de las rieras que desembocan en el delta. IPZ 1: Infiltración procedente de la lluvia. REC: Volumen de agua derivada por los canales de riego que es realmente utilizada por la vegetación. IC: Volumen de agua infiltrada por exceso de dosis de riego y por infiltración en los canales. PMC: Volumen de agua que se pierde por los canales en el mar. B: Volumen anual de agua bombeada por todos los pozos del embalse subterráneo. PMS: Salida o pérdida subterránea que va al mar directamente o a través del río Llobregat aguas abajo de San Juan Despí. I: Infiltración o recarga anual del embalse subterráneo. VR: Variación de las reservas de agua almacenadas en el embalse subterráneo. PM: Pérdida total o volumen de agua que va al mar, superficial o subterráneamente.

- b) $I = B + VR + PMS.$
- c) $IR = I - IC - RC - IEZ 2.$
- d) $PMR = Total - (RC + ABS + ER + IR + IPZ 1 + IEZ 2).$
- e) $PM = PMS + PMR.$

El estudio del cuadro, aun dentro del amplio margen de error que pueden contener algunas de sus cifras, nos da bastante luz sobre el volumen importante que la infiltración puede suponer (hasta 235 Hm.³/año) y sobre la variación en la cantidad de agua almacenada en el embalse (que puede llegar a 125 Hm.³). También es importante advertir que el volumen de agua utilizada (REC + ABS + B) es todavía muy pequeño en relación con el volumen de agua superficial (PMR + PC) que se pierde en el mar. En otras palabras, nos encontramos ante un río que está muy poco regulado.

Un estudio puramente estadístico de los datos análogos a los de la figura 8, correspondientes al decenio 1945-1955, ha sido realizado por Montalbán (1968), quien obtiene la relación siguiente, cuyo coeficiente de correlación es 0,72:

$$dh = 0,976 + 0,037 Q - 0,0085 B,$$

donde:

- dh = variación mensual (en m.) del nivel piezométrico en Cornellá.
- Q = caudal medio (en m.³/s.) del río Llobregat en Martorell el mes anterior.
- B = volumen medio diario de agua bombeada por la S.G.A.B. el mes anterior (10³ m.³/día).

Esta fórmula pone de manifiesto, al igual que los estudios anteriores, la importancia que en la recarga del acuífero tienen infiltraciones, cuyo origen (lluvia, excedente de riego, etc.) no guarda relación con las oscilaciones del caudal del río. El valor que se deduce de la fórmula para la cantidad de agua contenida en un metro de espesor de acuífero es de unos cuatro millones de metros cúbicos; es decir, inferior a la deducida anteriormente. Esperamos que estudios posteriores, basados en datos más completos y exactos, nos permitan aclarar estas diferencias.

En síntesis podemos decir que la infiltración total de agua en el embalse subterráneo del delta del Llobregat oscila entre 60 y 240 Hm.³/año. La infiltración debida a los regadíos y a las aguas de lluvia que caen directamente

sobre la zona o en las cuencas de las riberas que desembocan directamente en el delta, oscilan entre 50 y 90 Hm.³/año; la infiltración que procede directamente del río Llobregat puede oscilar entre 5 y 170 Hm.³/año, y depende no sólo del régimen del río, sino también de que el embalse subterráneo esté más o menos lleno y tenga espacio vacío para recibir esa posible infiltración.

Así vemos, por ejemplo, que en 1958-59, la infiltración fue máxima, mientras que al año siguiente, aun tratándose de un año muy húmedo, fue relativamente pequeña por encontrarse el embalse casi lleno. En la presente etapa de los estudios es todavía prematuro determinar cuál es la máxima capacidad de embalse que puede obtenerse en el delta del Llobregat sin provocar una intrusión de agua marina. Sin embargo, no nos parece imprudente contar con que entre las cinco unidades hidrogeológicas citadas se pueda contar con una capacidad superior a 150 Hm.³.

Por otra parte, se observa también en los valores del balance que en los años no húmedos, y aunque el embalse subterráneo tenga espacio libre o vacío, hay un elevado porcentaje de agua del río que se pierde en el mar inútilmente, debido a que la capacidad de infiltración o recarga natural de las aguas del río es netamente inferior al caudal de agua que pasa por el río.

La regulación del río Llobregat ha sido estudiada (Vilaró, 1967) en la hipótesis de consumo constante y regulación hiperanual. En la figura 9-b pueden verse los volúmenes de embalse necesarios en función del caudal regulado y de su probabilidad o garantía. Vemos, por ejemplo, que con un volumen de embalse

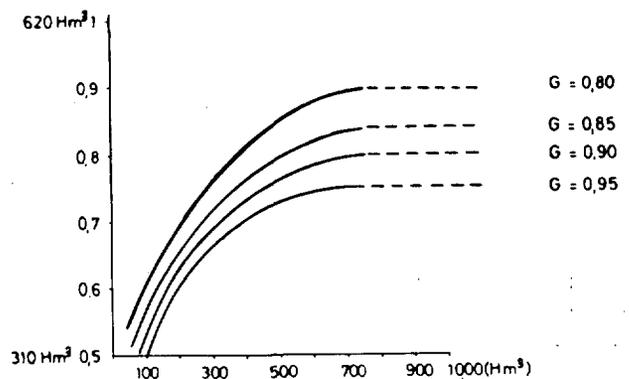


Fig. 9-b. — Relación entre la capacidad de embalse necesaria y el flujo del río Llobregat regulado (G = probabilidad del flujo regulado) (según Vilaró, 1967).

igual a 550 Hm.³ podemos regular el 80 por 100 de la aportación del río, con una probabilidad del 85 por 100.

Si tenemos en cuenta que en los embalses subterráneos hay una capacidad mínima de 150 Hm.³, y que es posible construir embalses de superficie con capacidad superior a los 400 Hm.³ (325 000 *acre foot*), vemos que se podría realizar una regulación prácticamente completa del río.

El esquema hidráulico propuesto por nosotros es la utilización de los embalses convencionales como elemento de retención de crecidas y regulación hiperanual. Los embalses subterráneos, situados junto al centro de consumo, servirían para la regulación anual, cubriendo las variaciones estacionales de caudales y las puntas diarias del consumo.

Por otra parte, los acuíferos, al mismo tiempo que el embalse, son conductos, y por ello se considera que el abastecimiento a los pequeños consumidores se podría atender con aguas tomadas directamente del embalse subterráneo, y en cambio se atendería a los grandes consumidores con la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas.

Evidentemente, este primer esquema exige su concreción mediante estudios detallados en modelos y mediante la construcción y experimentación de estaciones de recarga artificial. Al mismo tiempo se hace necesaria una reforma en nuestra legislación de aguas subterráneas que evite la anarquía y descontrol que actualmente existe.

3.5. Hidrogeoquímica.

La variación de la calidad del agua subterránea en los diferentes puntos del embalse subterráneo, y a lo largo del tiempo y las causas de dichas variaciones, han sido objeto de intensos trabajos por parte de Custodio (1967 y 1968), que no hay tiempo de exponer ahora con detalle.

En las figuras 10-a y 10-b damos la distribución, en 1966, del contenido en Cl⁻ de las aguas del acuífero profundo y superficial del delta del Llobregat. Las variaciones en el acuífero superficial se deben a la heterogeneidad de las aguas de recarga (canales de riego, lluvia, aguas residuales de industrias, etc.). La zo-

na de intrusión de agua marina es de poca importancia.

En el acuífero profundo (fig. 10-a) llama especialmente la atención la existencia de una zona de agua de mejor calidad (Cl⁻ < 150 p.p.m.) en la parte central del delta. Por diversas razones se piensa que gran parte de estas aguas se infiltraron hace al menos cuarenta años, durante el período en que la calidad del agua del río era mejor debido a no recibir contaminación industrial ni procedente de unas minas de potasa situadas aguas arriba. Se observa claramente en los bordes oriental y occidental el comienzo de la intrusión marina. La inferior calidad de las aguas de la zona occidental, probablemente, se debe al reciclaje de las aguas utilizadas para los riego que se van cargando progresivamente de sales.

Se observa un progresivo empeoramiento de la calidad de las aguas en el acuífero superficial y en el Pallejá-Cornellá, que se corresponden con el progresivo empeoramiento de la calidad del agua del río. En el acuífero profundo también empeora la calidad — independientemente de la intrusión marina —, debido a la infiltración de aguas procedentes del acuífero superior. Las cantidades de tritio (H³) que contienen estas aguas parecen comprobar la hipótesis de la importancia de la infiltración vertical. (Custodio, 1968.)

4. Recursos y demandas de aguas.

La población de la cuenca del Pirineo Oriental, en 1967, era de algo más de cuatro millones de habitantes, de los cuales cerca de tres millones viven en el área metropolitana de Barcelona, en la que además está también concentrada la mayor parte de la industria de la región. En los estudios realizados por la Comisión de Recursos Hidráulicos del II Plan de Desarrollo de España (1968) se considera que el año 2000, la población en la cuenca será de casi 10 millones de habitantes, lo que supondrá una densidad de 590 hab./Km.², frente a una densidad calculada de 90 hab./Km.² para el conjunto de España.

La superficie actualmente regada es de 70 000 Has. Se estima que esta superficie podría llegar a duplicarse en el futuro, alcanzándose en total 140 000 Has.

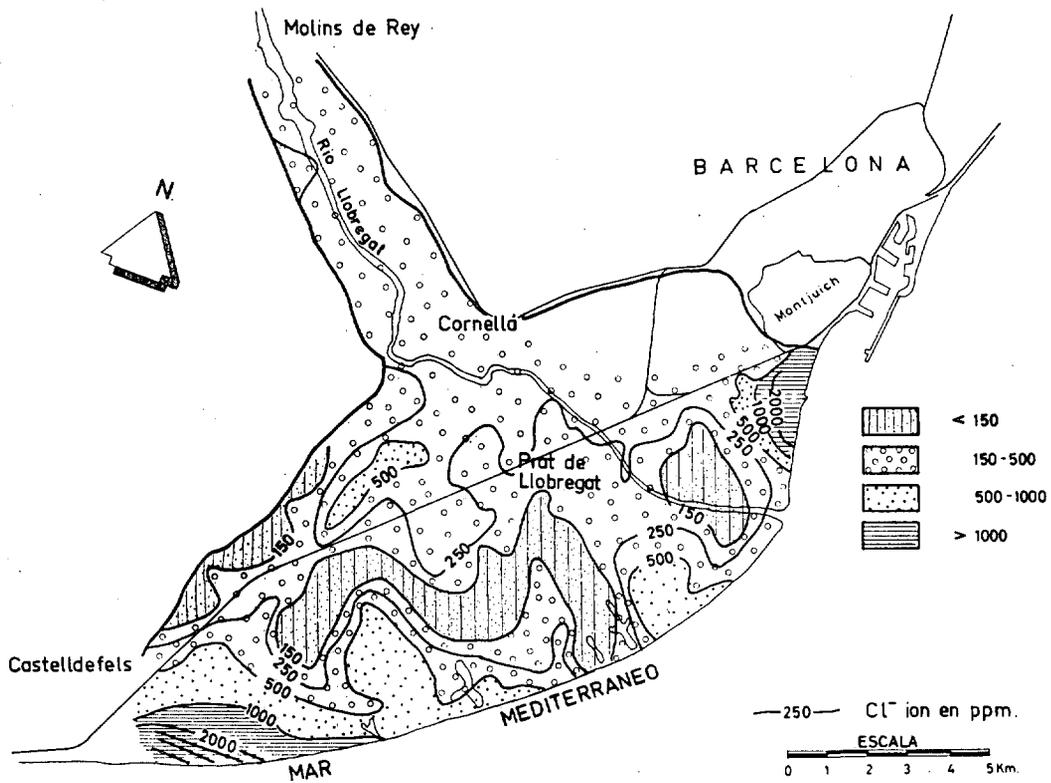


Fig. 10-a. — Mapa de iclosuros en el acuífero libre de Pallejá-Cornellá y en el acuífero profundo del delta del Llobregat.

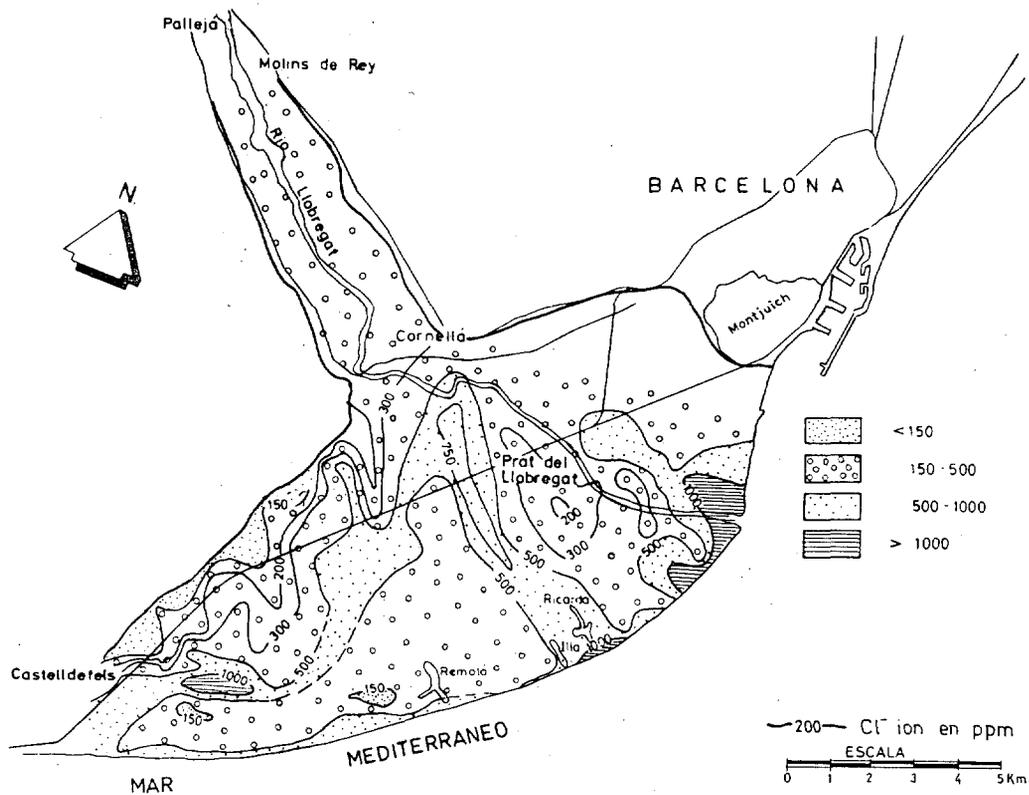


Fig. 10-b. — Mapa de iclosuros en el acuífero libre de Pallejá-Cornellá y en el acuífero superior del delta del Llobregat.

Los volúmenes de agua necesarios para atender esas previsiones son los siguientes:

Año	Uso municipal e industrial — Hm. ³	Regadío — Hm. ³	Total — Hm. ³
1967	450	480	930
1972	580	650	1 230
2000	2 360	1 250	3 610

La importancia que en las cifras anteriores de necesidades de agua supone la zona de Barcelona es siempre bastante superior al 50 por 100 del volumen total de la demanda.

Los recursos hidráulicos brutos de la cuenca del Pirineo Oriental son de 2 000 Hm.³/año (Llomas, 1967). Los recursos regulados mediante embalses superficiales fueron 800 Hm.³ en 1967, y se espera alcanzar los volúmenes de 947 Hm.³ en 1972 y 1 400 Hm.³ en el año 2000, cuando se construyan los embalses actualmente previstos. En la misma cuenca, el volumen de agua subterránea utilizado en 1967 fue de 400 Hm.³ y se estima que la utilización de aguas subterráneas aumentará considerablemente en los años próximos.

En una cuenca hidrográfica, la utilización de las aguas subterráneas puede, con frecuencia, considerarse análoga a la obtención de una mayor capacidad de embalse, lo que produce una mayor regulación y un mayor volumen de agua utilizable. No obstante, no puede olvidarse que el volumen de agua utilizable de modo permanente no puede sobrepasar la cifra de los recursos hidráulicos brutos si no es a base de utilizar las reservas acumuladas a lo largo de los siglos en los embalses subterráneos, lo que no debe ser tomado en consideración a no ser que estudios técnicos y económicos detallados justifiquen claramente esta medida. Vemos, pues, que hacia el año 2000, la demanda de agua de la cuenca del Pirineo Oriental sobrepasará en unos 1 800 Hm.³ a los recursos totales o, dicho de otro modo, que la demanda de agua será aproximadamente el doble de los recursos totales.

5. Problemas hidráulicos planteados.

Los principales aspectos que plantea o va a plantear el abastecimiento de agua a la zona

de Barcelona y a toda la cuenca del Pirineo Oriental son los siguientes:

5.1. Escasez de agua.

Hemos visto que hacia el año 2000 la demanda duplicará a la totalidad de los recursos de la cuenca y, por tanto, será preciso buscar probablemente otras fuentes de aprovisionamiento distintas del consumo de las reservas subterráneas (río Ebro, desalación de agua del mar, tratamiento de aguas residuales, etc.). Actualmente, algunas zonas del sur de la cuenca ya presentan déficit de agua, y se considera (Vilaró, 1967) que la zona de Barcelona sólo podrá atender a su demanda hasta 1985 en el caso de que se realice el aprovechamiento integral de toda la cuenca del Pirineo Oriental.

5.2. Degradación de la calidad del agua.

Los problemas que se refieran a esta cuestión pueden agruparse esencialmente en los grupos siguientes:

a) Contaminación de los ríos por los vertidos de aguas industriales. Es un hecho que afecta ya de modo grave a los ríos Besós, Tordera y Llobregat; en este último, el problema viene acentuado, como ya se dijo, por los vertidos procedentes de la explotación de unas minas de potasa en su curso alto.

b) Contaminación de los acuíferos o embalses subterráneos cuando son alimentados en buena parte por las aguas de los ríos. Este es el caso de los acuíferos de los ríos Besós y Llobregat, por ejemplo.

c) Avance de la intrusión de agua del mar en algunos acuíferos costeros a causa del exceso de bombeo.

d) Por último, también hay que tener en cuenta la progresiva contaminación de las aguas del mar en la zona de la costa próxima a Barcelona, debida a las aguas residuales de la ciudad que se vierten al mar sin previa depuración.

5.3. Cuestiones legales.

La legislación de aguas española tiene casi un siglo de existencia y parte del principio de

que el agua subterránea es un bien privado que pertenece al dueño del terreno en el que está situado el pozo. Fácilmente se comprende que mientras esta situación no cambie es muy difícil realizar unos proyectos que lleven consigo operaciones de recarga, ubicación adecuada de campos de pozos, etc.

5.4. *Problemas de formación humana.*

La falta de conciencia del hecho de la unidad del ciclo hidrológico y del interés económico de las aguas subterráneas, por parte de algunos sectores importantes en la vida del país, ha supuesto hasta fecha reciente un serio hándicap para conseguir una planificación adecuada de los recursos hidráulicos totales. Esta situación se ha debido, en cierto modo, a que no hay todavía suficiente número de expertos en hidrología subterránea para atender a las necesidades actuales del país.

6. Plan de operaciones.

Para resolver dichos problemas está previsto un programa de operaciones, en parte ya realizado, que en síntesis es el siguiente:

6.1. *Formación de expertos.*

En una primera etapa, algunos de los ingenieros y geólogos del Ministerio de Obras Públicas fueron enviados a efectuar estudios de hidrología subterránea a otros países con más experiencia, como Israel, Alemania, Francia y Estados Unidos.

Desde 1967 se organizan en Barcelona cursos de hidrología subterránea para postgraduados. Estos cursos tienen una duración de seis meses, y en los tres primeros cursos han participado 73 ingenieros y geólogos procedentes de once países; las clases fueron desarrolladas por expertos del Ministerio de Obras Públicas con la colaboración de algunos expertos extranjeros y nacionales. Esta actividad es patrocinada por el Ministerio de Obras Públicas, conjuntamente con una fundación científica privada y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España.

6.2. *Estudio de los recursos hidráulicos totales de los ríos Besós y bajo Llobregat (2 000 kilómetros cuadrados).*

Fue iniciado hace cuatro años. Sus líneas principales han sido expuestas en esta conferencia. Puede decirse que conocemos suficientemente la geología de la zona, y de modo semicuantitativo, lo referente a su hidrogeología. Dentro del próximo año esperamos que puedan efectuarse los primeros ensayos de recarga artificial, que estén a punto los modelos matemáticos y/o analógicos para proyectar el aprovechamiento integral de las cuencas de los ríos Llobregat y Besós. También se ha iniciado el estudio de un régimen jurídico que permita poner en práctica lo que la técnica indique como más adecuado.

6.3. *Estudio de los recursos hidráulicos totales del resto de la cuenca del Pirineo Oriental.*

Se va a extender a toda la cuenca (16 550 kilómetros cuadrados) un estudio de recursos hidráulicos totales análogos al de la zona de Besós-Llobregat. Este estudio durará tres o cuatro años y permitirá establecer el programa de proyectos de ingeniería adecuado para una óptima utilización de los recursos de la propia cuenca, que de este modo podrá ser, probablemente, autosuficiente hasta dentro de quince o veinte años. Tanto este estudio como el anterior son realizados conjuntamente por la Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental y el Servicio Geológico de Obras Públicas.

6.4. *Otros estudios.*

Simultáneamente se están realizando otros estudios locales. Pueden citarse, por ejemplo, los que se refieren a la eliminación de las fuentes de polución de las aguas de los ríos Llobregat y Besós y sobre los que se ocupan del posible tratamiento de las aguas residuales de Barcelona, con el doble objeto de disminuir la contaminación de la costa y estudiar las posibilidades de su reutilización. Por último, añadiremos que en breve comenzará el estudio detallado de viabilidad técnica y económica del acueducto procedente del río Ebro.

Bibliografía.

Custodio, E. (1967): *Etudes Géohydrochimiques dans le delta du Llobregat*. Barcelone (Espagne). Publication numéro 73. Assemblée de Berne, pp. 134-155. A.I.H.S.

— (1968): "Datación de aguas subterráneas en el delta del río Llobregat". *Agua* (suplemento científico). (En prensa.) Barcelona.

Llamas, M. R. (1967): "Sobre el papel de las aguas subterráneas en España". *Agua*, julio-agosto, págs. 2-19.

Llamas, M. R., y Mollist, J. (1967): "Hidrología de los deltas de los ríos Besós y Llobregat". *Agua* (suplemento científico núm. 2), págs. 139-154. Barcelona.

Llamas, M. R., y Vilaró, F. (1967): "Die Rolle der Grundwasserspeicher bei der Wasserversorgung von Barce-

lona". *Wasser und Abwasser*. 108 Jahrgang. Heft 34, pp. 945-953.

Llamas, M. R. (1968): "Los estudios regionales de recursos hidráulicos totales". *Boletín Informativo del Ministerio de Obras Públicas*, núm. 123. Madrid.

Montalbán, F. (1968): "Estudio estadístico de los factores de las oscilaciones del acuífero del bajo Llobregat". *Agua* (suplemento científico) (en prensa). Barcelona.

Vilaró, F. (1967): "Balance del aprovechamiento actual del bajo Llobregat". *Agua* (suplemento científico, número 2), págs. 155-171. Barcelona.

Vilaró, F., y Martín, M. (1968): *Balance hídrico del bajo Llobregat*. Seminario sobre Balances Hídricos. F.A.O. Abril 1968. Madrid (en prensa).