

RECARGA ARTIFICIAL Y ORDENACION DE ACUIFEROS

Por CEFERINO ALVAREZ FERNANDEZ

Dr. Ing. Hidráulico

Aunque con algún retraso, nos es grato publicar el presente artículo, que a pesar del tiempo transcurrido desde la celebración del simposio, conserva su interés por los temas que trata y las sugerencias que contiene, siendo deseable que sean recogidas por todos aquellos que se plantean encontrar solución alguna a los problemas de planificación de recursos hídricos.

Bajo este título se celebró en Haifa del 18 al 26 de marzo un simposio organizado por la Asociación Internacional de Hidrología Científica (AIHS), bajo el patrocinio de la UNESCO.

Los temas planteados para la discusión fueron los siguientes:

1. Recarga artificial de los acuíferos y almacenamiento subterráneo.
2. Intrusión salina.
3. Explotación de acuíferos.

La importancia de estos problemas, ya subrayada por varios discursos y escritos, se refleja por la cantidad y la calidad de los asistentes al coloquio, cuyo número era de 217 especialistas venidos de 21 países.

También era muy interesante la celebración del coloquio en Israel, ya que esos temas implican, para ese país, una realización vital, y pudo apreciarse *de visu* cómo se llevan a la práctica el estudio y la explotación de una vasta zona acuífera.

Fueron ante todo problemas prácticos planteados por las necesidades regionales o nacionales de aprovechamientos hidráulicos. Hay que notar, en efecto, el interés creciente de obtención de datos y de utilización de los embalses subterráneos en la planificación de recursos hídricos.

El estudio de esos embalses subterráneos requiere una serie de conocimientos de la zona, tanto desde el punto de vista geológico como hidrológico. Al obtener esos datos, el problema

que se plantea entonces, y que es del mejor aprovechamiento, se resuelve principalmente con modelos analógicos sobre los cuales ya volveremos a hablar y que fueron utilizados en la mayoría de los casos.

Vamos a exponer lo esencial de lo presentado, a fin de poder desprender algunas conclusiones.

1. Recarga artificial de los acuíferos y almacenamiento subterráneo.

Treinta y cinco memorias estaban consagradas a este tema, y se descomponen en: 9 de Israel, 6 de Rusia, 10 de Estados Unidos, 5 de Francia, 2 de Holanda, 2 de Alemania y 1 de Hungría.

Los objetivos de la sobrealimentación de un acuífero pueden clasificarse en:

- Mantener o restablecer un nivel de agua: es lo que se propone en Francia en los valles del Rin, Ródano y Garona, donde obras para la navegación, producción de energía, riego, modifican el régimen de las capas acuíferas.
- Puesta en reserva, en momentos de excedentes, de volúmenes de agua para utilizar en el futuro según las necesidades.
- Sobrealimentación como consecuencia de obras, cuyo objetivo era diferente: por ejemplo, riego.

— Tomas de agua indirectas en los ríos por captaciones en las capas aluviales vecinas.

Uno de los aspectos esenciales de la sobrealimentación es la calidad del agua y su poder de atarquinamiento cuando contiene sedimentos.

P. Prudhomme [1] expuso cómo el problema de la recarga artificial de un acuífero puede ser económicamente rentable si se utiliza un modelo analógico para determinar la eficacia de la recarga y particularmente del dispositivo proyectado. Las bases teóricas de un tal modelo parten de la escritura de la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_{(x,y)} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{(x,y)} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + B,$$

cuya solución puede escribirse si s es el ábside curvilíneo sobre una línea de corriente:

$$r = T_0 e^{-[F(s) - F(s_0)]} + e^{-F(s)} \int_0^s \left[B x \frac{ds}{dh} + Sg(s) \right] e^{F(s)} ds;$$

$$F(s) = \int_0^s f(s) ds; \quad f(s) = s h \frac{ds}{dh} y g(s) = \frac{\partial h}{\partial t} \cdot \frac{ds}{dh}.$$

Esa demostración permite enunciar la proposición siguiente: "Si la transmisividad T_0 es conocida en un punto M_0 de una línea de corriente (L), se puede conocer T en cada punto de esa línea".

La determinación de las características de un acuífero es entonces posible y eso de manera única utilizando el trayecto de las líneas de corriente. Los datos recogidos en el campo e introducidos en el modelo simulador permiten de esta forma una posible solución en la medida de que esos datos sean compatibles entre ellos.

El profesor R. J. M. de Wiest [2] expone el problema de un proyecto de recarga de una zona acuífera cuya escorrentía debida a la lluvia alimenta la capa freática en la región de Princeton, en los Estados Unidos. La mayor parte de la recarga natural del acuífero se produce durante la época de lluvias de noviembre hasta finales de mayo. El nivel así obtenido en el acuífero aumenta el flujo de ese acuífero hacia el río y eso produce una pérdida de agua dulce hacia el mar. Esta pérdida sería reducida por la construcción de una presa; el aumento de nivel en el río, disminuyendo automáticamente el gradiente hidráulico del depósito subterráneo hacia

el río y limitando así las pérdidas al mar. El depósito subterráneo sería a su vez bombeado simultáneamente y eso aumentaría el espacio disponible para la retención de lluvias de invierno y verano.

J. Tixeront y J. M. Daniel [3] llevaron a cabo el estudio de la sobrealimentación del depósito subterráneo del uadi Biskra, de características:

espesor, 30 a 40 m.	
$T = 2.10^{-2}$	m. ² /s.
$K = 5.10^{-4}$	m./s.
$S = 5$	km. ²
$V = 20$ a 30.10^6	m. ³ .

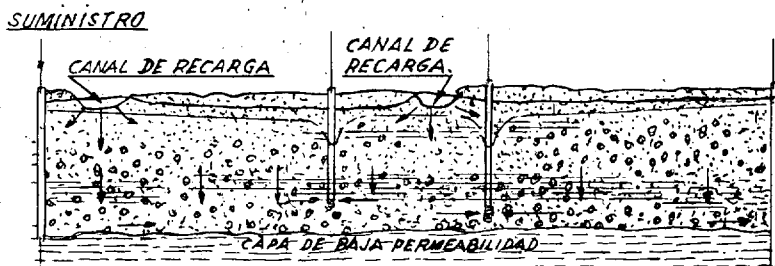
El descenso del nivel del agua, liberando un volumen de depósito suplementario, ha permitido una sobrealimentación del sistema y pudo conseguirse una regularización de las aportaciones discontinuas parecida a la que provoca un embalse superficial. La búsqueda de un óptimo de ese fenómeno de regularización, ha conducido a la realización de un modelo por simulación analógica sobre una red eléctrica con resistencias y capacidades a fin de encontrar el dispositivo de captación y el caudal de bombeo necesarios a la explotación máxima. Ese estudio ha permitido determinar una velocidad diaria útil de infiltración de 3 a 5 cm./día, según la época y el volumen de la crecida considerada.

M. Deutsch [4] explicó cómo el Geological Survey hizo en el Michigan unos ensayos para demostrar la posibilidad de realimentar una capa en una formación glaciaria, invirtiendo el gradiente entre ésta última y un acuífero libre. La capa artesiana está situada en una formación que consiste en arenas y gravas depositadas en un valle preglaciario y cubierto por una capa impermeable de depósitos lacustres de época glaciaria. Las arenas superiores contienen una capa freática en relación hidráulica directa con un arroyo que la drena. Los coeficientes de transmisividad para las capas superiores e inferiores tienen respectivamente como valor $1,6 \cdot 10^{-2}$ m.²/s. y $1,2 \cdot 10^{-2}$ m.²/s.

En las condiciones naturales, la superficie piezométrica de la capa inferior es más elevada que la superficie libre en las arenas superiores y la infiltración a través de la capa impermeable se hace hacia arriba. El bombeo en los pozos que toman el agua de la capa inferior inversa, la dirección de la infiltración entre las capas, pero un bombeo sostenido tendría como efecto



"A" Condiciones naturales.



"B" Condiciones de bombeo.

Figura 1.

de producir un descenso que puede suponer una invasión de la capa por agua de las capas inferiores, aguas químicamente menos buenas.

Tres ensayos de realimentación fueron ensayados provocando una rebaja de la superficie piezométrica. En el primer ensayo se permitió la bajada de la capa superior; en el segundo, la carga de la capa superior en la parte de los pozos fue mantenida constante por realimentación directa de la capa superior utilizando un canal; en el tercer ensayo se ensanchó el canal de forma a mantener en la capa superior la carga constante en casi todo el campo.

Cada ensayo sucesivo presentaba una mejora hidráulica, mejora que aumentaba la diferencia de carga entre las dos capas, y por consiguiente aumentaba la percolación en las capas. El valor de la percolación de la capa superior a la capa inferior después de los tres ensayos eran respectivamente de 96, 108 y 114 l./s. Después de seis años de funcionamiento, los niveles del agua son prácticamente los mismos que cuando se construyeron los pozos. La cantidad de agua de recarga fue prácticamente la misma que la que se ha bombeado en 1965.

El acuífero costero de Israel fue estudiado por Y. Harpaz y J. Schwarz [6] para determinar su capacidad de almacenamiento y sus respuestas a un esquema planificador de operaciones establecidas por el sistema nacional de suministro de agua.

El problema del agua en Israel se caracteriza por la escasez de recursos hídricos y la

distribución desfavorable de las tierras en relación con esos recursos.

El acuífero del centro de Israel produce anualmente unos 300 millones de metros cúbicos, tiene la forma de un rectángulo de 3 500 kilómetros cuadrados y de dimensiones 100 por 35 Km., constituido por formaciones de calizas y de dolomitas.

Anteriormente a 1950, muy pocos pozos extraían agua del acuífero. En 1961, 46 pozos bombeaban 24 millones de metros cúbicos; en 1963 ese número llegaba a 217 pozos y 280 millones de metros cúbicos/año fueron extraídos. Los ensayos de sondeo han permitido definir una transmisividad de 200 000 m.²/día en algunas zonas y 10 000 m.²/día en otras. El coeficiente de almacenamiento es de 0,1 a 0,5 · 10⁻² en los acuíferos cautivos y de 3 · 10⁻² a 10⁻¹ para la capa freática.

El estudio del acuífero se realizó utilizando un modelo analógico con resistencias y capacidades. Después del ajuste dinámico del modelo, se estudiaron varias condiciones del sistema de recarga y bombeo para conocer las variaciones de los niveles de la capa y obtener una optimización del acuífero.

S. H. Aberbach y A. Sellinger [5] plantean por su parte el problema propio de la recarga en el acuífero de Israel a fin de evitar la entrada de aguas salinas. Se pueden distinguir cuatro zonas de recarga a lo largo de la costa. En Emek Hefer 6 millones de m.³ son inyectados a través de 5 pozos; en Tel-Aviv, la recarga ar-

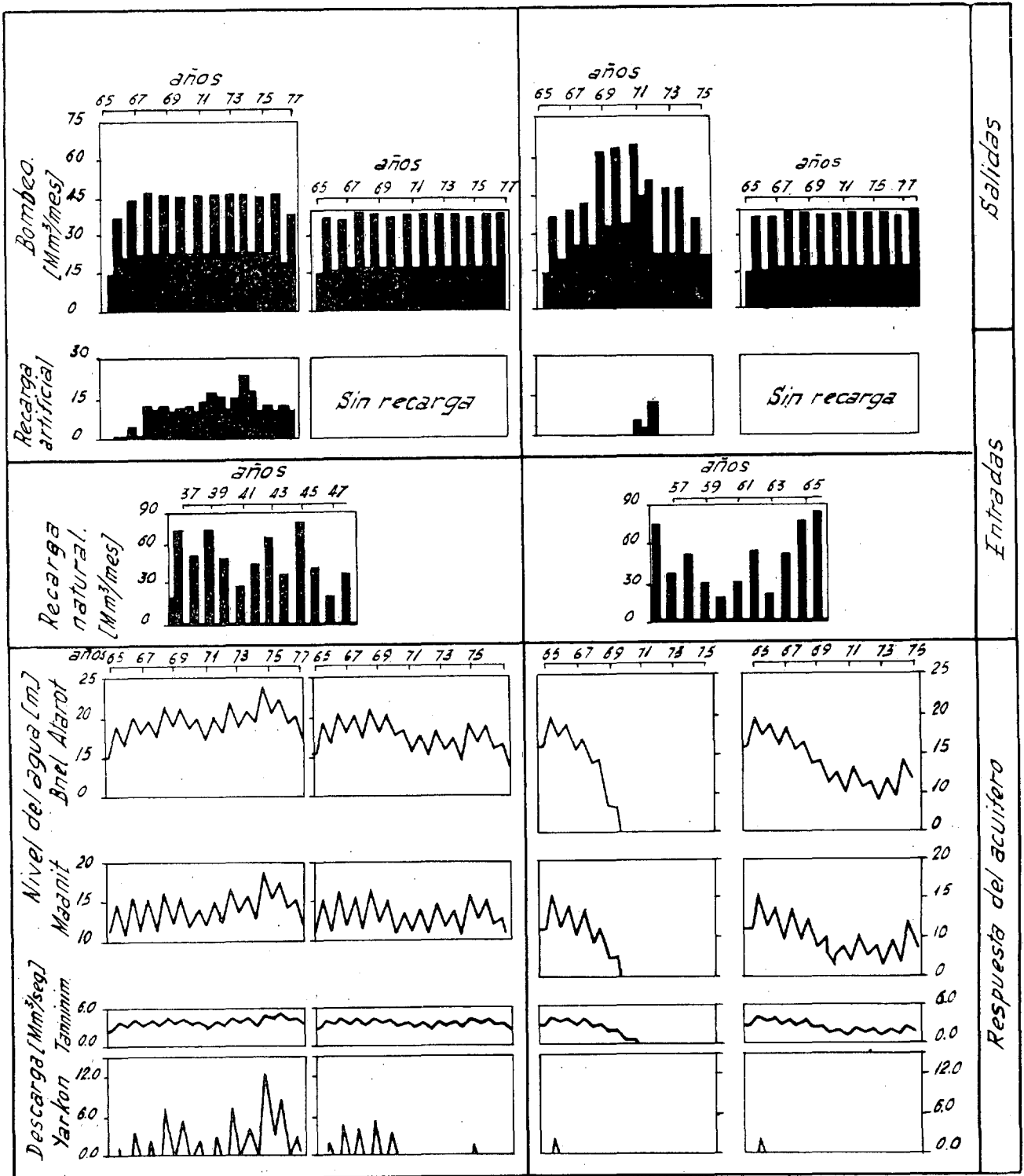


Fig. 2.ª. — Resultados comparativos de varias épocas y condiciones, obtenidos en modelo analógico en la zona de Israel.

tificial es de 18 millones de m.³, con 27 pozos; hacia el Sur, 85 pozos son utilizados para 40 millones de m.³, y en las arenas de Yavne, 12 millones de m.³ se infiltran a través de depósitos con una velocidad de 1,5 a 2 m./día.

2. Intrusión salina.

Once Memorias trataron este tema.

Citaremos el estudio de D. E. L. Maasland y M. N. Bittenger [9] sobre el drenaje de una capa acuífera salina recargada por agua dulce. Este estudio se llevó a cabo sobre un modelo a placas con el fin de determinar la velocidad de modificación de calidad del agua para diferentes distancias de los drenes, velocidad de recarga y permeabilidades.

J. Debuissón y H. Moussu [8] plantearon el estudio experimental de la intrusión de aguas marinas en una capa costera del Senegal bajo el efecto de explotación. Las perforaciones de reconocimiento fueron realizadas por rotación; se averiguó que los filtros en materia plástica no deforman el log eléctrico, que queda idéntico al que resulta de la operación hecha antes del montaje del tubo de revestimiento en el sondeo de lodos. Los sondeos fueron ejecutados por rotación y equipados de 1 ó 2 tubos piezométricos. Se comprobó que la técnica por logs eléctricos se revela sensiblemente eficaz cuando se trata de:

- De descubrir rápidamente los primeros signos de contaminación de una capa de agua dulce por agua salina.
- De seguir los progresos de una contaminación ya empezada.
- De juzgar de la eficacia de las medidas tomadas para combatir o limitar la extensión de una polución.

El pasaje de aguas dulces a aguas saladas se hace por intermedio de una zona de transición, la cual se define muy bien examinando los logs eléctricos de resistividad.

A. Schmorak [7], por su parte, dio cuenta de los trabajos realizados en Israel desde 1954 por el Servicio Hidrológico a lo largo de tres filas de pozos construidos en el Plio-Pleistoceno en la costa del Mediterráneo. El objetivo de esas investigaciones era definir la localización exacta del interfacio, de seguir su movimiento y determinar la velocidad de propagación del agua del mar, a fin de permitir una explotación racional de la capa acuífera.

Las siguientes condiciones tienen que rellenarse a fin de garantizar una precisión razonable en las interpretaciones de los resultados de medidas:

- Dos pozos de observación, por lo menos, tienen que estar situados perpendicularmente a la costa.
- Los filtros tienen que tener una longitud suficiente y una localización adecuada para facilitar una medida correcta.
- Se necesitan unos conocimientos exactos de la Geología en la zona de entradas de agua salina y particularmente de las zonas semipermeables.
- Hace falta un período de observación prolongado para conocer el avance del interfacio en función de las diversas épocas y de las diversas condiciones de bombeo, alimentación, etc.

3. Explotación de acuíferos.

Once memorias se refieren a este tema.

P. A. Domenico [10] expuso bajo el título: "La utilización del agua junto a los aspectos económicos", el problema que se plantea en Smith Valley, en Nevada. Los pozos que suministran el agua complementaria para los riegos son propiedad de los particulares y son ellos quienes aseguran su funcionamiento. El agua de los pozos se puede utilizar conjuntamente con las aguas de superficie para el riego de unos 25,5 Km.², mientras que unos 35,5 Km.² pueden solamente utilizar las aguas superficiales. Gracias al rendimiento de los pozos, la mayor parte de los que pueden utilizarlos están asegurados de satisfacer en cada período sus necesidades de agua, y eso independientemente de la cantidad de agua disponible. Si nos basamos en la curva de rendimiento y caudales de los pozos años atrás, las estaciones de bombeo actualmente en servicio podrían, bajo control centralizado, satisfacer hasta un 93 por 100 de las necesidades hídricas. El problema se reduce entonces en decidir el modo de funcionamiento adecuado. Se propone, en vistas de hacer posible la gestión del sistema hidrológico de forma eficiente, que el "Operating Water District" compre los pozos y asegure la responsabilidad de su funcionamiento, actuando en calidad de único propietario.

Con ese ejemplo, y podríamos encontrar otros similares en España, se plantea la nece-

sidad de planificación de la explotación de los recursos hídricos de una zona. ¿Cómo puede llevarse esa planificación? Chun, Weber y Mido [12] nos indican que en el Estado de California han utilizado un modelo matemático para simular el comportamiento dinámico del embalse subterráneo. Los estudios geológicos e hidrológicos han dado los datos y un computador digital fue utilizado para ensayar el modelo.

N. Buras [11] agrupa en cinco fases el plan de trabajo para definir la explotación máxima de un acuífero:

1. Programa de planteamiento, que corresponde a un estudio de reconocimiento.
2. El estudio de planteamiento que encierra seis etapas:
 - a) Definición del problema.
 - b) Planteamiento de los objetivos a alcanzar.
 - c) Síntesis del sistema que satisface a los objetivos.
 - d) Análisis del sistema.
 - e) Selección del sistema más adecuado.
 - f) Redacción de una Memoria resumiendo esa fase.
3. Proyecto.
4. Estudio durante la fase de desarrollo (que puede corresponder a una planta piloto).
5. Ingeniería general que comprende la formulación del problema y la construcción de un modelo matemático.

Para J. Bear y O. Levin [13] el criterio de rendimiento óptimo se establece como criterio para el estudio y la utilización de las capas subterráneas. Proponen utilizar este criterio a fin de reemplazar los conceptos generalmente uti-

lizados de "rendimiento de seguridad" o "rendimiento de explotación". Ese criterio óptimo se basa en:

- Las características físicas del acuífero.
- Consideraciones económicas.
- Las características del sistema de recursos hídricos.

La idea básica consiste en considerar el acuífero como un sistema sobre el cual se puede operar de manera óptima.

El sistema $S(t)$ comprende una función objetiva y unas subjeciones. El criterio de planificación es la maximización de la función objetiva sujeta a todas las subjeciones implicadas. El modelo representa una simple célula que representa una zona homogénea de un acuífero y que comprende una instalación de recarga R y de bombeo P , así como una alimentación natural N y un desagüe Q .

P y R son variables de decisión, mientras que Q y N son variables no controlables directamente. Tenemos pues:

$$\frac{dS}{dt} = N(t) + R(t) - P(t) - Q(S).$$

El modelo económico encierra las siguientes funciones y parámetros:

a) Una función demanda $\delta_i(P)$:

i) = son dos épocas del año.

los beneficios medios son:

$$B_i(P) = \int_0^B \delta_i(\eta) d\eta + B_0; \quad B_0 < 0,$$

b) Las funciones $CP(P)$ de bombeo y $CR(R)$ de recarga.

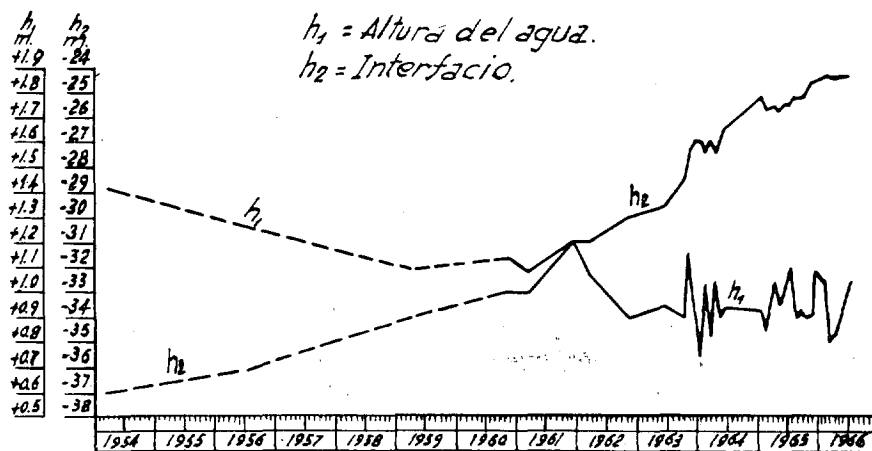


Fig. 3.^a. — Observaciones en el pozo 602, en la zona costera de Israel.

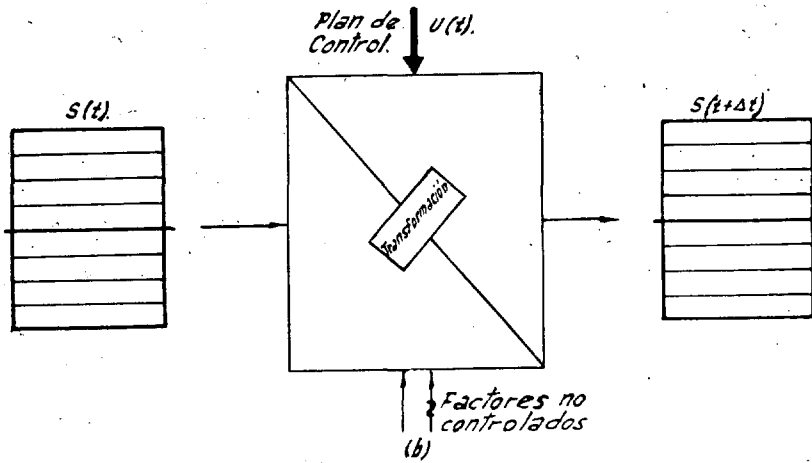
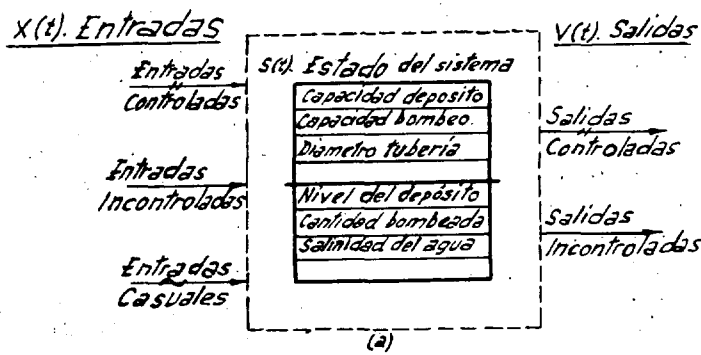


Figura 4.^a

c) El interés r %.

d) Un cierto valor $U_{s,v}(S_v)$, que representa el volumen de agua que queda en el depósito al final del período de operaciones.

La función objetiva a maximizar es en estas condiciones de la forma:

$$V = E \left[\sum_{t=1}^T D^{t-1} U_t(P, R) + D^T U_{s,v}(S_v) \right]$$

Con:

$U_t = B_t(P) - [C_{P,t}(P) + C_{R,t}(R)]$ beneficios netos en la época t ;

$D = 1/(1 + r/100)$ = factor de descuento;

T = tiempo del proyecto;

S = nivel del embalse subterráneo al final de T épocas;

E = operador relacionado con N_t de cada época.

La ordenación del uadi Nebaana, en Túnez central [14], se basa en la utilización simultánea de aguas superficiales de un embalse en construcción en Sidi Messaoud y de las aguas subterráneas contenidas en los aluviones continentales de la parte norte de la llanura de

Kairouan. Debido a las necesidades, la explotación de las aguas subterráneas se imponían, por una parte, a fin de completar los recursos regularizados por la presa, y por otra parte a fin de subsanar en las temporadas de sequía un déficit de aguas de escorrentía superficial.

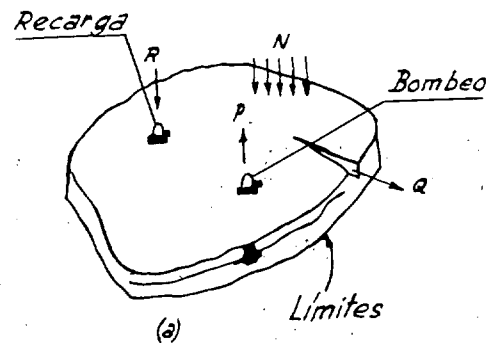


Figura 5.^a

Con vista a la elección de un dispositivo de explotación que dé una optimización económica del número de perforaciones en función del costo de las instalaciones y de los gastos

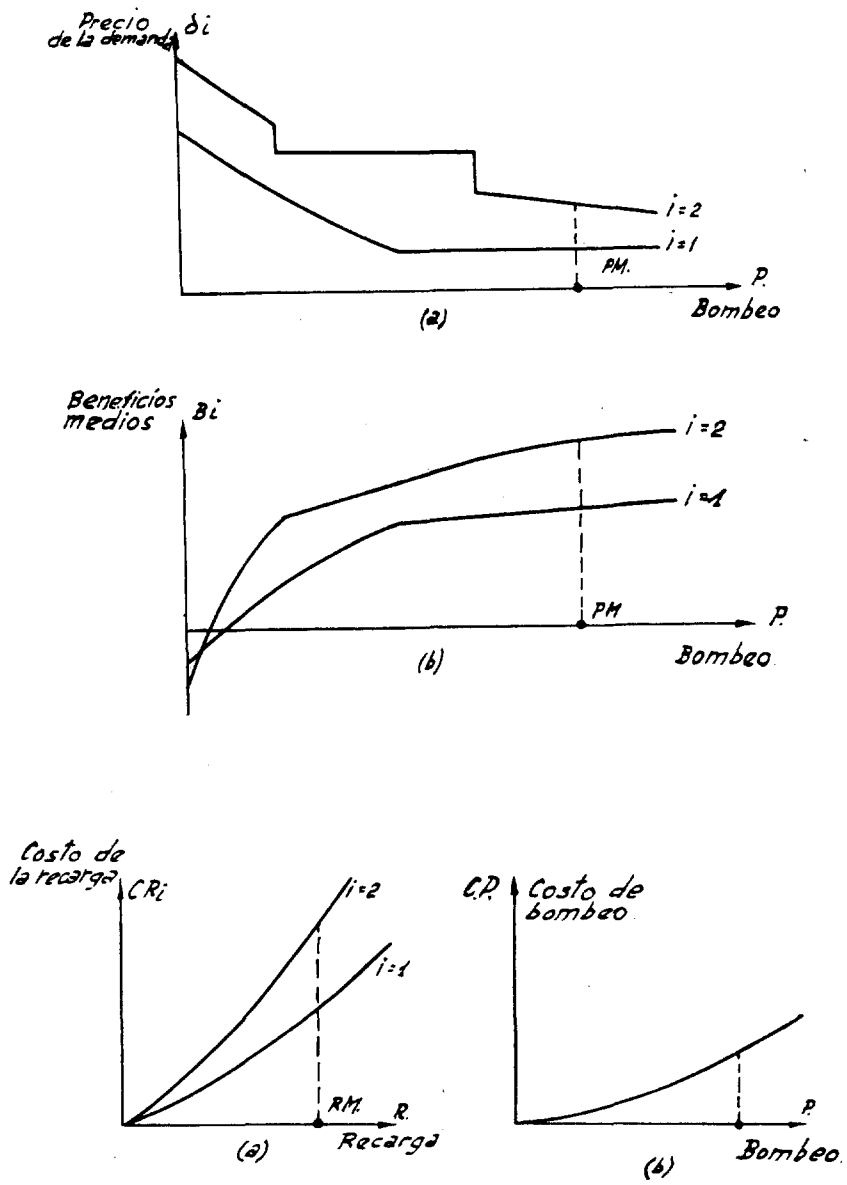


Figura 6.ª

de funcionamiento, era necesario tomar en cuenta todos los datos y todas las condiciones impuestas. Fue la razón del empleo de un modelo analógico con resistencias y capacidades. Se han dispuesto los pozos de captación de forma lo más regular posible en la zona de transmisividad elevada. El caudal óptimo económico de explotación fue elegido como caudal medio de achicamiento a fin de calcular el número de perforaciones a realizar. El programa de bombeo impuesto al modelo está basado sobre la explotación ficticia del embalse de Nebaana, realizada gracias a treinta y tres años de medidas

en una estación de aforos. Este estudio ha indicado que el complemento necesario a pedir al embalse subterráneo podía repartirse globalmente en:

- 27 años a 10^7 m.³/año;
- 6 años a $1,3 \cdot 10^7$ m.³/año.

Cuatro dispositivos han sido estudiados. Para cada dispositivo se ha levantado sobre cada pozo del modelo la curva de bajada de presión en función del tiempo.

Los resultados obtenidos indicaron que cualquiera que sea el caudal de explotación, la ba-

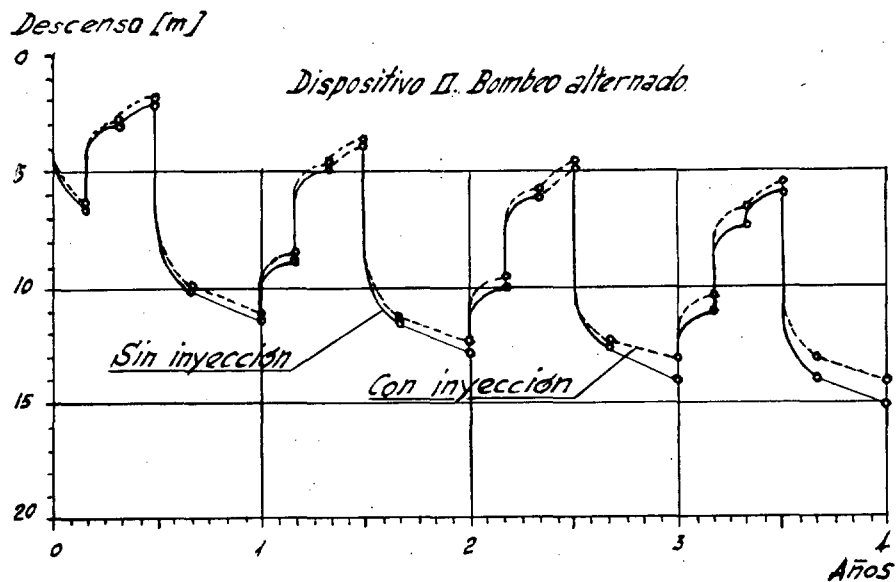


Fig. 7.^a. — Curva de descenso = $f(t)$.

jada de nivel en las perforaciones es continua, es decir, que no se logra nunca la estabilización con régimen permanente. Para un caudal medio fijado, la rebaja de la capa es prácticamente independiente del número de perforaciones.

Según A. Bonnier, J. M. Daniel y A. Lagarde, la utilización de un modelo de resistencias y capacidades permite ventajosamente el estudio completo llevado desde el descubrimiento de un embalse subterráneo no explotado, a través de su reconocimiento geológico e hidrológico hasta su puesta en explotación.

Conclusiones.

Las conclusiones que se desprenden del coloquio son principalmente las que ponen de relieve el interés que cada país aporte en la utilización completa y racional de los recursos hídricos. En la actualidad una planificación en ese sentido tiene que considerar el ciclo hidrológico completo, es decir, las aguas superficiales y las aguas subterráneas.

Esa toma de consideración de las aguas subterráneas trae consigo una serie de problemas nuevos que son, por hoy, poco o mal conocidos. Por eso, la experiencia de cada uno en su caso particular permite aumentar y enriquecer el conocimiento de los demás, y pienso que eso fue el objetivo del coloquio de Haifa que ha logrado un éxito en tal sentido.

Referencias.

1. PRUDHOMME, P.: *Représentativité des modèles utilisés pour l'étude de la recharge artificielle des nappes.*
2. DE WIEST, R. J. M.: *Artificial recharge through augmented bank storage.*
3. TIXERON, J., y DANIEL, J. M.: *Note sur la suralimentation des nappes.*
4. DEUTSCH, M.: *Artificial recharge by induced interaquifer leakage.*
5. ABERBACH, S. H., y SELLINGER, A.: *Review of artificial groundwater recharge in the coastal plain of Israel.*
6. HARPAZ, Y., y SCHWARZ, J.: *Operating a limestone aquifer as a reservoir for a water supply system.*
7. SCHMORAK, A.: *Salt water encroachment in the coastal plain of Israel.*
8. DUBUISSON, J. y MOUSSU, H.: *Une étude expérimentale, au Sénégal, de l'intrusion des eaux marines dans nappe cotière sous l'effect de l'exploitation.*
9. MAASLAND, D. E. L., y BITTINGER, M. W.: *Drainage of saline water aquifer recharged by fresh water.*
10. DOMENICO, P. A.: *Economic aspect of conjunctive use of water, Smith Valley, U.S.A.*
11. BURAS, N.: *System engineering and aquifer management.*
12. CHUN, R. Y. D.; WEBER, E. M., y MIDO, K. W.: *Planned utilization of ground water basins: studies conducted in southern California.*
13. LEVIN, O., y BEAR: *The optimal yield of an aquifer.*
14. BONNIER, A.; DANIEL, J. M., y LAGARDE, A.: *Étude complète de l'exploitation d'un réservoir souterrain sur l'analyseur électrique à réseau R.C.*