

EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL PLAN HIDROLÓGICO NACIONAL **

Andrés Sahuquillo Herraiz*
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

En el Anteproyecto del Plan Hidrológico Nacional, se limita de forma drástica la posibilidad de que las aguas subterráneas puedan contribuir a solucionar problemas de demanda. Esto implica la necesidad de tener que realizar mayores inversiones y el renunciar a los aumentos de regulación, de garantía, de robustez y a la mayor capacidad de resolver algunos problemas ambientales que se pueden conseguir a través del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. Se describe para algunos casos españoles y extranjeros la utilización alternativa que consiste en bombear más aguas subterráneas en años con menos disponibilidad de agua en ríos y embalses, haciéndose más utilización de aguas superficiales en años húmedos. El volumen de agua almacenable en los acuíferos entre niveles altos y bajos sirve para regular caudales superficiales de forma económica y eficaz sin tener que recurrir a la recarga artificial. También se analizan las posibilidades de recarga inducida y recarga artificial y se analizan las situaciones en las que se pueden utilizar ventajosamente en España.

Se discute la afirmación hecha en la Memoria del P.H.N., en la que se dice que las aguas subterráneas están aprovechadas en su gran mayoría bien directamente, o indirectamente al estar utilizados los drenajes de los acuíferos a los ríos. Para que esto sea cierto sería necesario a) que no existiesen, en las zonas de demanda o puntos de toma, otros caudales aprovechables, regulados o no, distintos de los subterráneos y b) que con el uso de los acuíferos a través de la utilización conjunta no se pudiesen aumentar las disponibilidades de agua. Condiciones éstas que por contra parece sí se cumplen en muchas de las cuencas y sistemas españoles por lo que su utilización podría proporcionar soluciones eficaces a muchos problemas. Se recomienda que se analicen con detalle las diversas alternativas de uso conjunto a través de modelos adecuados y con el detalle necesario. También es necesario que se hagan públicos los estudios realizados en los que se basan las decisiones del P.H.N., así como los que se realicen en el futuro.

Motivaciones y cuestiones previas

Desde hace años, y al igual que muchos profesionales dedicados a la gestión de los recursos hidráulicos, he manifestado intranquilidad y preocupación sobre como se estaban desarrollando

algunos aspectos de la política hidráulica en España. Recientemente expuse en la Revista de Obras Públicas discrepancias con respecto a los criterios que, según se podía deducir de filtraciones publicadas por la prensa o declaraciones de personas del MOPT, se estaban utilizando en la gestación del Plan Hidrológico Nacional en relación a las aguas subterráneas, la contaminación y el medio ambiente, así como sobre sus objetivos y la forma de llevarlos a cabo.

*Universidad Politécnica de Valencia, E.T.S. de I. de Caminos, Canales y Puertos

** Recibido en ROP: Diciembre de 1993

PLANA DE CASTELLON

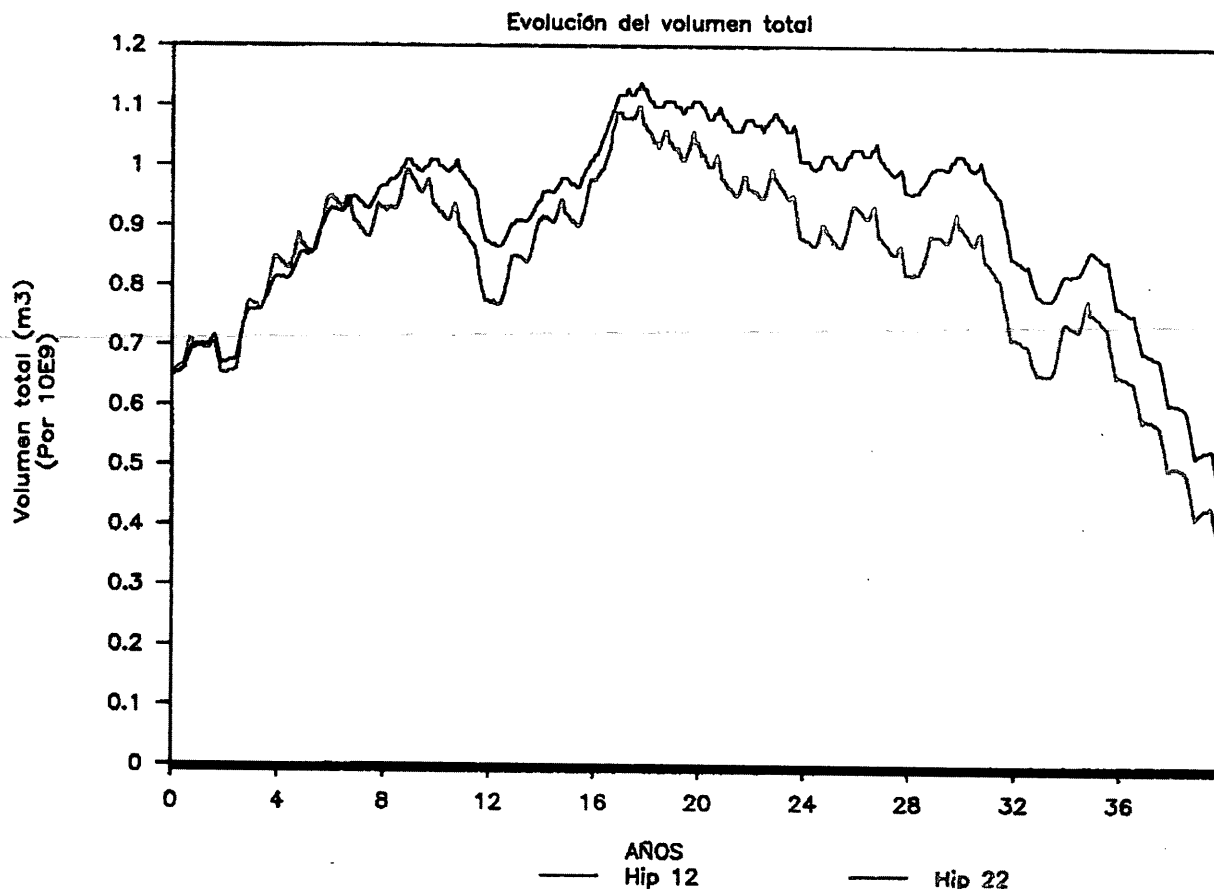


Figura 1. Volumen de agua en el acuífero por encima de la cota 0

Una vez hecho público el Plan Hidrológico Nacional, recojo la invitación amplia que hacía la Revista de Obras Públicas en su número de Febrero de 1993 en la que animaba a presentar contribuciones sobre este y presento mi opinión sobre el tratamiento concreto que se da a las aguas subterráneas en las líneas de acción y soluciones del P.H.N.. A la vez, y para que puedan recogerse y discutirse los puntos de vista de más compañeros y otros profesionales, es deseable que este aspecto se discuta con la amplitud necesaria tanto en las Jornadas sobre Planificación Hidrológica del Colegio de Ingenieros de Caminos anunciadas para el mes de Diciembre de 1993, como en la Comisión sobre Aguas Subterráneas que se ha creado dentro de la Comisión de Hidráulica del Colegio a propuesta de varios catedráticos de Escuelas de Ingenieros de Caminos de nuestro país.

Las aguas subterráneas sirven en la actualidad como fuente de abastecimiento de más de un tercio de la población y la cuarta parte de la superficie regada en nuestro país se hace con ellas. Hay

provincias enteras en que el abastecimiento urbano depende de los acuíferos y en varias comunidades autónomas las poblaciones se surten mayoritariamente de ellas. En otras, como la Comunidad Valenciana, el cuarenta por ciento de la superficie regada lo es con aguas subterráneas. Anualmente se bombean unos 5.500 Hm³/año (un 18% del total de la utilizada para usos consuntivos) según el P.H.N.. A pesar de ser significativas estas cifras, muchos pensamos que su participación en la solución de los problemas hidráulicos tendría que aumentar, fundamentalmente en forma de utilización conjunta con las superficiales. No obstante, en el P.H.N. su contribución es de solo el 13% sobre los 8.300 millones de metros cúbicos anuales en que se prevé aumentar la regulación para el año 2012, horizonte del plan. En cuencas enteras con posibilidades no sólo competitivas sino extraordinariamente favorables se niega o minimiza la capacidad de las aguas subterráneas de contribuir al aumento de disponibilidades, o a la solución de los problemas existentes. Para poder argumentar sobre lo que un con-

junto de profesionales pensamos son errores del P.H.N., conviene exponer antes algunos conceptos e ideas previos.

Las aguas superficiales y subterráneas pueden realizar funciones complementarias en un sistema de recursos hidráulicos. La que vamos a comentar con más detenimiento es la de regulación o almacenamiento (Sahuquillo, 1993), aunque puede ser importante su función como elemento de distribución y la posibilidad de contribuir a la gestión de la calidad y tratamiento del agua. Además de los recursos utilizables de forma permanente, los acuíferos disponen de grandes volúmenes en almacenamiento que han proporcionado cantidades muy importantes de agua a lo largo de decenios. En general esta explotación se ha hecho de forma incontrolada y en algunos casos ha producido problemas serios. En otros, la facilidad de disponer de forma económica de recursos importantes de agua ha sugerido que se proponga la utilización planificada de la reserva utilizable una sola vez. Esto se ha llevado a la práctica en Israel y propuesto en muchos países y hay una metodología contrastada para modelar y optimizar económicamente las diversas secuencias de construcción del resto de componentes que se irían añadiendo a un sistema cada vez más complejo de utilización conjunta (Mandel, 1967; Schwartz, 1980).

Papel de los acuíferos en la regulación de los recursos hidráulicos

La capacidad de almacenamiento de un acuífero puede aprovecharse cuando se utiliza conjuntamente con embalses superficiales si se hace más uso de éstos o de los caudales circulantes por los ríos en los periodos húmedos, y por el contrario se bombea más de los acuíferos en periodos secos. Al final de un periodo seco el acuífero tendrá niveles más bajos que al final de uno húmedo. El volumen de agua almacenable entre la situación de niveles piezométricos altos y la de los más bajos sirve como elemento de almacenamiento. En definitiva como elemento de regulación, o lo que es equivalente para aumentar las disponibilidades de agua. Hay que resaltar además algo a lo que apenas se ha prestado atención aunque es de importancia crucial; operando un sistema con elementos superficiales y subterráneos de esta forma que hemos denominado utilización alternativa se consigue un mayor aprovecha-

miento de los recursos superficiales, y sin tener que recurrir a la recarga artificial, que es un componente normalmente caro. Pero además, y esto es también sumamente importante, se puede conseguir disminuir la explotación media anual de los acuíferos, al bombearse menos y utilizarse más aguas superficiales en los años húmedos. Esto lo podemos ver muy claramente en realizaciones españolas alguna de las cuales están operando de forma muy eficiente.

En La Plana de Castellón, las oscilaciones piezométricas del acuífero proporcionan al sistema una capacidad de almacenamiento de más de 600 millones de metros cúbicos, lo que representa más de tres veces la capacidad de almacenamiento de los embalses del río Mijares. El abastecimiento urbano e industrial depende exclusivamente del acuífero. El agua para riego se suministra exclusivamente a partir de aguas superficiales en las zonas costeras de riegos tradicionales. También hay zonas con riego exclusivo con aguas subterráneas, y otras en las que su fuente de abastecimiento es mixta, siendo mayor la procedente de las aguas superficiales en periodos húmedos, y bombeándose más de los acuíferos en los secos. Los embalses superficiales existentes en el río Mijares son el de Arenós, de 130 Hm³, situado en la cuenca alta del río, el de Sichar, de 50 Hm³, situado inmediatamente aguas arriba de la entrada del río en la Plana de Castellón, y el de María Cristina, de 28 Hm³, en la Rambla de la Viuda su afluente principal en la margen izquierda con caudales intermitentes y escasos. En la figura 1 se pueden ver las oscilaciones del volumen de agua almacenada en el acuífero para tres alternativas de gestión distintas. La número 11 representa la situación estructural existente en estos momentos, introduciendo mejoras en la operación del sistema, resultantes de un proceso de optimización. Las número 12 y 22 suponen distintas ampliaciones de los canales que permiten aumentar la zona en que se utilizan alternativamente aguas superficiales y subterráneas. Operando el sistema de esta manera se conseguiría además reducir el problema de la intrusión marina existente en Moncófar en la zona sur del acuífero, donde la cuña salada se haría retroceder lentamente hacia el mar. Aspecto este que se ha comprobado con un modelo del acuífero en el que se simula conjuntamente el movimiento del agua dulce, del agua salada y de la interfaz entre las dos (Confederación Hidrográfica del Júcar, 1991). También se ha analizado la posibilidad de utilizar la recarga artificial.

Las mejoras que produciría serían con respecto a la calidad de agua para abastecimiento en determinadas zonas al poderse disminuir el contenido en nitratos. En cambio los aumentos de disponibilidades con las alternativas de recarga artificial estudiados serían pequeños.

Quizás el esquema de mayores dimensiones que se ha propuesto siguiendo esta idea de utilización alternativa es el del Valle Central de California, en el que la capacidad total de los embalses superficiales sería de 27.000 Hm³, mientras el almacenamiento subterráneo, 37.000 Hm³, se conseguiría con oscilaciones piezométricas bastante reducidas, aunque dentro de límites técnicos y económicos aceptables sería posible conseguir más de 100.000 Hm³ de almacenamiento subterráneo (California Department of Water Resources, 1957).

Esquemas de utilización alternativa, como el descrito existen en otras zonas del Mediterráneo español cuya gestión es posible mejorar y optimizar con modelos de simulación y gestión adecuados, campo en el que la contribución y experiencia española es importante (Andreu y Sahuquillo 1987, Andreu et al 1991, Andreu 1993). Lo más interesante de esta idea es que pueden ser aplicado a cualquier esquema en el que existan embalses ya construidos, pudiéndose a la vez aumentar el aprovechamiento de las aguas superficiales, y a la vez disminuir el bombeo medio de los acuíferos en el caso de que tuvieran problemas de sobreexplotación o intrusión marina. Las posibilidades para muchas zonas de las cuencas del Pirineo Oriental, Júcar y Sur son evidentes. Y en general en todos los casos en que exista una presa, o la posibilidad de construirla, y un acuífero

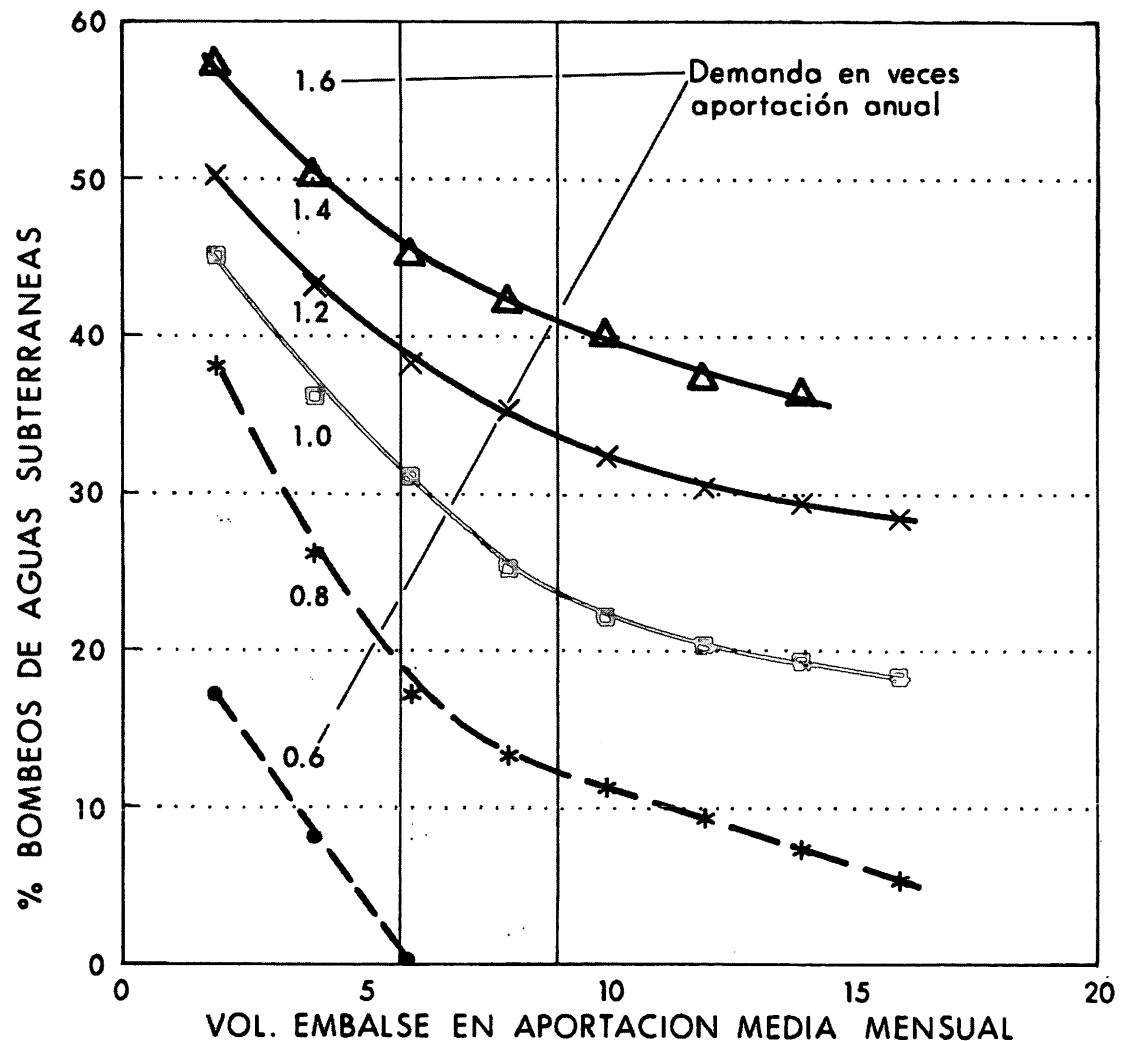
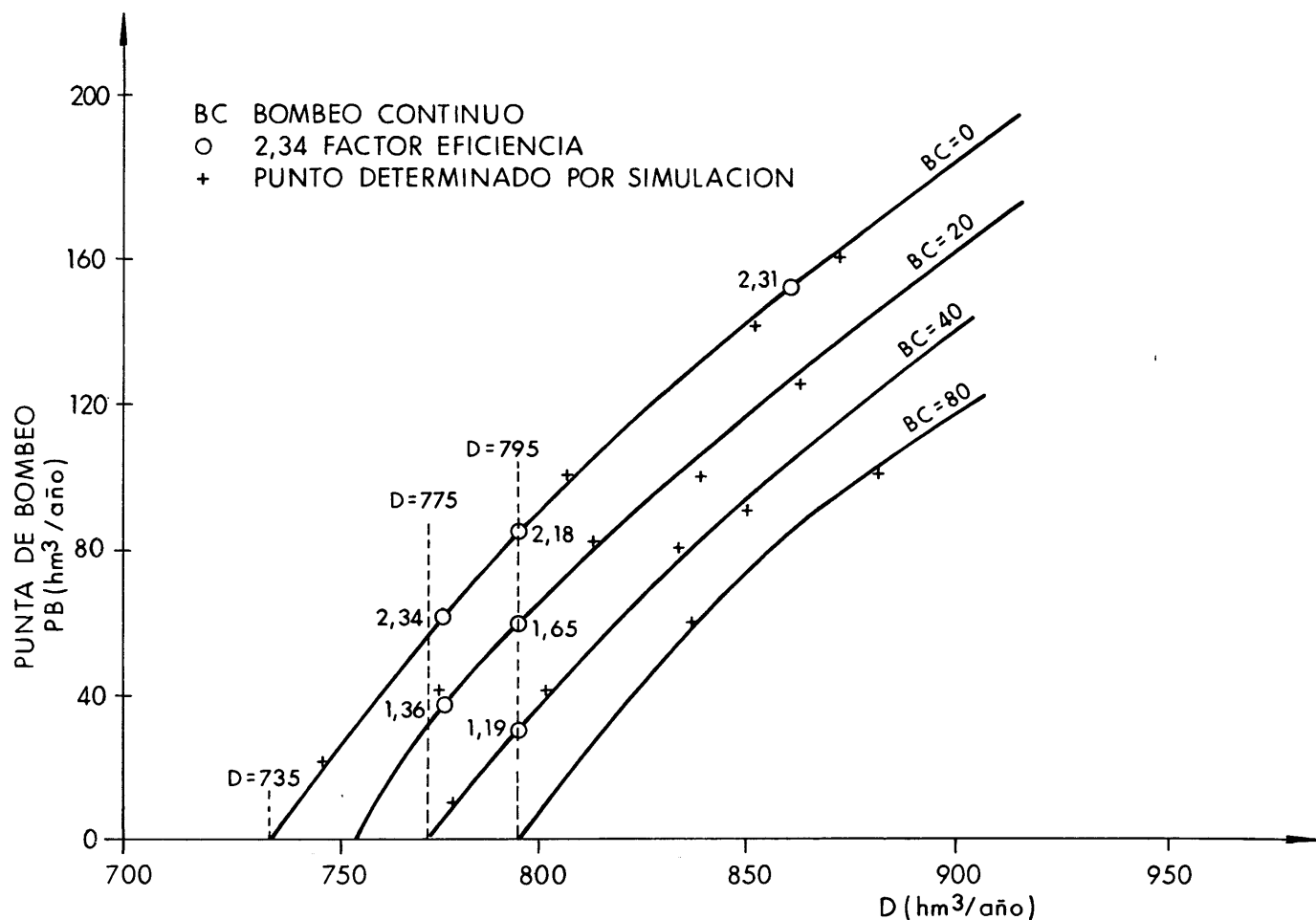


Figura 2. Aumento de disponibilidades con el bombeo alternativo de aguas



ALTERNATIVAS DE SATISFACCION DE LA DEMANDA CON AGUAS SUBTERRANEAS (GARANTIA=97%)

TERCIARIO DETRITICO DE MADRID

ro. También, por supuesto, en situaciones más complejas.

Monzonis (1988), analizó para distintas características de aportaciones superficiales, el aumento de disponibilidades que se podrían conseguir con esta forma de utilización alternativa a partir de un sistema simple formado por un embalse y un acuífero. Para separar las interacciones mutuas consideró que las aguas superficiales del sistema no estaban relacionadas con el acuífero. El análisis lo realizó para aportaciones con distinta variabilidad y autocorrelación; consideró distintos tipos de demanda, estacional para riego, uniforme común para abastecimiento urbano e industrial, o mixta. También consideró distintas capacidades

de embalse en relación con la aportación media del río. En la figura 2 se reflejan sus resultados para el caso de una demanda de tipo agrícola con un coeficiente de variación de 2, relativamente grande, para las aportaciones y una autocorrelación de 0.5, bastante común en España. Se pone claramente de manifiesto que los aumentos medios de disponibilidades conseguidas son sensiblemente mayores que los bombeos de aguas subterráneas, del orden del doble. Como hemos comentado antes, este aumento se debe a la posibilidad de utilizar más recursos en los años húmedos.

Se han analizado las posibilidades de utilizar los recursos del acuífero detrítico de la fosa del

Figura 3. Puntas de bombeo necesarias y factor de eficiencia.
 (Modificado de Sánchez, 1986)

Tajo, para complementar el abastecimiento urbano de la zona Metropolitana de Madrid servido con el Canal de Isabel II. Para ello se ha simulado todo el sistema de presas y conducciones del Canal, con la aportación histórica de 50 años, teniendo en cuenta además las restricciones de caudales mínimos en los ríos. La utilización más adecuada es la de la utilización del acuífero durante períodos cortos en épocas de sequía, empezando a bombear cuando el volumen embalsado descienda por debajo de uno determinado, (López Camacho y Varela, 1983). Sánchez (1986) para calcular el coste del agua con este procedimiento, analiza el número de pozos que es preciso instalar para proporcionar los caudales de punta en los años más desfavorables, junto con el bombeo medio anual y el aumento de disponibilidades. En la figura 3, adaptada de Sánchez, las ordenadas reflejan los puntos de bombeo anuales y las abscisas la demanda garantizada con el 97% de probabilidad considerando bombeos mínimos anuales, BC, desde 0 a 60 Hm³/año. Las cifras al lado de los círculos son el factor de efi-

ciencia. En el caso de que el bombeo mínimo que se exija para mantenimiento sea nulo o muy pequeño este factor supera a 2, es decir que por cada metro cúbico de agua bombeada aumentan las disponibilidades en más del doble.

Con esta forma de utilización alternativa el aumento de la explotación de las aguas subterráneas en época de sequía ha demostrado ser un método muy eficaz para paliar sus efectos en España y muchas otras partes del mundo (Sahuquillo, 1991; CDWR y CSWRCB 1982).

Recarga artificial

La utilización alternativa de presas y acuíferos no es incompatible con la recarga artificial en años con mayores aportaciones, o bien en ciertas zonas del acuífero.

La recarga artificial es otra forma de utilizar el almacenamiento de los acuíferos aunque en ge-

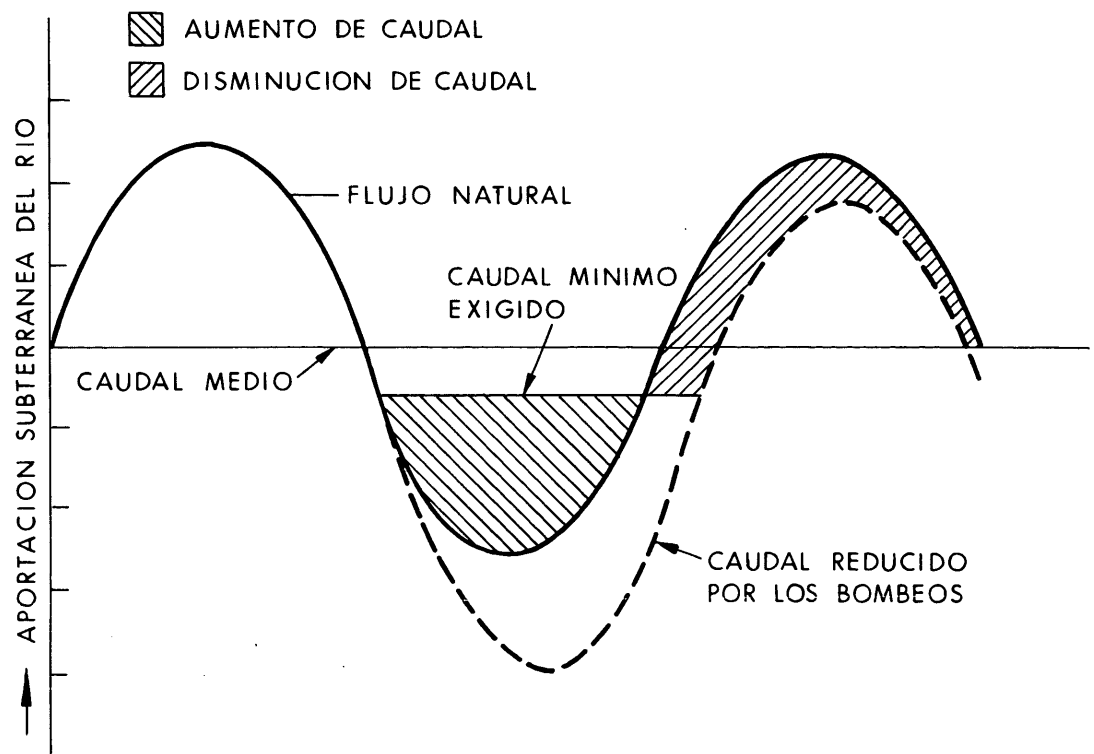


Figura 4. Regulación del caudal de un río bombeando aguas subterráneas.

CUADRO V. 9

Cuenca Hidrográfica	Recarga Anual	Usos			Salidas no aprovechadas	
		Directos	Asociados a la descarga natural		Ríos	Subterráneas al mar
Norte*	2975	51	604	(A,I)	2000	120
Duero	1875	373	1492	(H,R,A)	--	10 ⁽¹⁾
Tajo	1645	164	1476	(H,R,A)	--	5 ⁽¹⁾
Guadiana	754	771	183	(R)	--	40
Guadalquivir	2315	450	1550	(R,A)	260	65
Sur	1160	424	492	(R,A,H)	200	80
Segura	548	466	367	(R,A)	--	10
Júcar	3505	1440	1485	(R,H,A)	420	215
Ebro	2923	209	2499	(R,H,A)	175	40
Cataluña, Cuencas internas	1036	447	374	(A,R)	110	115
Baleares	585	283	50		116	150
Canarias	700	350	50	(R)	70	230
TOTAL	20021	5428	10622		3551	1080

*Incluida Galicia- Costa; A= Abastecimiento; R= Riesgos; H= Hidroelectricidad; I= Industria

(1) Acuíferos fronterizos con Portugal

Fuente: Plan Hidrológico Nacional. Memoria

neral es un procedimiento mucho más costoso. El prestigio y espectacularidad de las realizaciones del Sur de California y de Israel ha hecho que en muchas ocasiones, incluyendo publicaciones muy prestigiosas se identifique recarga artificial con utilización conjunta, oscureciendo otras opciones que a mi entender son más adecuadas en la mayoría de las situaciones, entre ellas la que acabamos de comentar y proponer que se utilicen con más profusión en nuestro país.

En la cuenca del Adaja, en la zona de Los Arenales, hay 15.000 hectáreas de riego con aguas subterráneas que inducen descensos progresivos en el acuífero. En la cuenca existían dos propuestas diferentes. Por una parte, la del MOPT, que

contempla la creación con el embalse de Mingorría de dos zonas regables una en la margen izquierda del río y otra en la derecha, en Arévalo y Olmedo respectivamente que totalizan 7.000 has, pero dejan sin resolver los problemas del acuífero. Por otra parte el I.T.G.E. propuso regar 7.200 has construyendo el embalse en el Adaja, 1.500 de las cuales están ya regadas con aguas subterráneas, además de hacer una recarga artificial de 6 Hm³/año con lo que se mejora aun más el balance del acuífero. En un estudio posterior, el S.G.O.P. propone ampliar la zona regable propuesta por el MOPT con 4.000 has de las que se estaban regando desde el acuífero, en el esquema se aplicaría la utilización alternativa bombeando menos en los años húmedos. Con esta alternativa se mejo-

raría más el balance del acuífero en la propuesta del I.T.G.E., sin tener que recurrir a la recarga artificial muy complicada en este acuífero. Además se conseguiría una ampliación de la superficie regada.

Recarga inducida, modificaciones de las relaciones río-acuífero

Algunos acuíferos muy explotados, al disminuir los niveles piezométricos, pueden cambiar su relación con el río, que puede pasar de ser ganador a perdedor. El acuífero de la Plana de Castellón, era drenado con seguridad por el río Mijares en las primeras décadas del siglo. Los niveles piezométricos están ahora por debajo del lecho del río en todo el tramo medio y final de su recorrido por la Plana de Castellón. El río proporciona una recarga anual al acuífero de unos 40 Hm³/año. El acuífero también es alimentado por las pérdidas de los embalses en terrenos calcáreos de Sichar y María Cristina en los que hemos desaconsejado su impermeabilización, por ser la recarga que producen favorable para el aprovechamiento de los recursos hidráulicos.

A todo lo largo de la costa mediterránea también se producen situaciones análogas en las que los ríos son, o se han transformado en perdedores al entrar en las llanuras costeras, o en sus deltas. Tal es el caso bien conocido del Llobregat (Custodio et al. 1977) o el del Palancia. El Palancia es un río con aportaciones medias relativamente importantes, del orden de 86 Hm³/año, y con una capacidad de embalse muy reducida (12 Hm³ en total cuando se termine el embalse de El Algar). Las posibilidades de recargar los acuíferos son interesantes, tanto a través del cauce del río, en la entrada del delta, que tiene problemas graves de intrusión marina, como en los acuíferos calizos. Además sería muy beneficioso que el nuevo embalse de El Algar tuviese filtraciones importantes. También es factible realizar sueltas programadas de los embalses para recargar los acuíferos en épocas de demanda reducida, y verter agua por los cauces en vez de que circule hasta el mar sin ningún provecho por las acequias. Este es un esquema que se repite una y otra vez en nuestra geografía.

Otra posibilidad con acuíferos de dimensiones medias o reducidas es el de aprovechar el retardo

que se produce entre los bombeos y la disminución de caudal en el río drenante, con lo que se pueden aumentar las disponibilidades de agua. Los bombeos se realizan en las estaciones secas en las que la demanda es mayor y es menor el caudal de los ríos. En estos sistemas denominados río-acuífero el aumento de disponibilidades también se obtiene a través de la distribución temporal de bombeos en el acuífero y al variar el volumen almacenado en éste entre los estados de niveles altos y el de los más bajos. En este tipo de utilización, la influencia de los bombeos sobre el caudal de los ríos es más rápida y es esencial el conocer bien las relaciones río-acuífero para poder valorar con suficiente precisión los intercambios de agua entre ambos en los modelos de simulación. En España se ha propuesto operar así en el aluvial del Guadalquivir y se está haciendo en la Vega Media y Alta del Segura donde puede aportar ciertas ventajas. En Estados Unidos se utilizan de forma intensa los sistemas río-acuífero en los ríos South Platte y Arkansas en el estado de Colorado, en ambos sistemas el aumento de disponibilidades que se consigue con la utilización conjunta es del orden del doble del que se conseguiría sin ella. En el Reino Unido están generalizadas en todas las cuencas de Inglaterra y Gales los esquemas de "river augmentation"; tanto, para aumentar el caudal de los ríos en estiaje como para utilizar directamente en centros de consumo. Esto se hace de forma muy eficaz y pragmática, y además ha servido para eliminar o combatir los efectos de las últimas sequías, (Dowling et al. 1974, Skinner 1983). La figura 4 es un esquema, ya clásico, de lo que se consigue en los sistemas río-acuífero cuando las dimensiones de éstos son reducidas.

Reducción de la incertidumbre y robustez

La utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas puede aumentar la garantía y disminuir la vulnerabilidad de un sistema, además de aumentar su robustez. La robustez se entiende como la capacidad de adaptarse a nuevas condiciones en la demanda con un coste adicional mínimo (Hashimoto et al. 1982). Son preferibles los proyectos capaces de ajustar su configuración, o sus reglas de operación a la evolución futura real de la demanda con un coste reducido. Lo mismo puede decirse para las incertidumbres hidrológicas y económicas y para hacer frente a situaciones de sequía. Las aguas subterráneas se han uti-

lizado como elemento de seguro en épocas de escasez o sequía. Un caso muy representativo es el del acuífero aluvial del río South Platte antes citado que ha sido estudiado con detalle por Bredehoeft y Young (1983). La capacidad de bombeo instalada en ese acuífero es suficiente para regar toda el área. Con una capacidad de bombeo alta se maximizan los beneficios totales y se minimiza la varianza, que se reduce prácticamente a cero. Al aumentar el caudal de bombeo se reduce el valor de predicción de caudales en un río en el que prácticamente no existe almacenamiento superficial. Una predicción poco ajustada puede compensarse con la modificación en los bombeos. Este es un ejemplo claro de como la incorporación de las aguas subterráneas, puede contribuir a disminuir la incertidumbre.

Desde otro punto de vista, el argumento último para apoyar la participación más o menos importante de las aguas subterráneas en un sistema de recursos hidráulicos es que cuantas más alternativas con componentes con características y con posibilidades distintas y en muchos casos complementarias, es mayor la posibilidad de conseguir ventajas adicionales. Al menos estas alternativas se deben estudiar con la profundidad y el detalle suficiente, pues en muchos casos es posible conseguir aumentos de disponibilidades, disminución muy importante de las inversiones, disminución de las incertidumbres, aumentos en la garantía y robustez de los sistemas y en muchas ocasiones soluciones que produzcan menos perturbaciones en el medio ambiente.

Crítica de los planteamientos del Plan Hidrológico

En mi opinión la Memoria del Plan Hidrológico Nacional tiene errores conceptuales sobre las posibilidades de aprovechamiento de los acuíferos, contiene afirmaciones discutibles y niega explícita o implícitamente las funciones que pueden desempeñar, o minimizan su papel.

La posición de los redactores queda reflejada en el final de la página 77 y en la página 78 que discutimos con detalle porque representan sin duda la clave de la argumentación.

En el cuadro V.9 se presenta un resumen de los resultados y cifras fundamentales y se insiste en dos puntos fundamentales:

a) El grado de compromiso actual de los recursos hidráulicos subterráneos -bien sea por utilización directa o bien porque las descargas a los ríos son aprovechadas posteriormente-, es muy alto (más del 80%), ya que supone más de 16.000 Hm³/año de los 20.000 Hm³/año de recarga natural.

b) Los volúmenes desaguados al mar (1.100 Hm³/año) no son utilizables sin riesgos de salinización de los acuíferos costeros.

En cualquier caso para que la afirmación hecha en a) sea cierta es necesario que se cumplan conjuntamente estas dos condiciones. La primera que si se sustrajese al caudal de los ríos un caudal igual a la aportación de los acuíferos quedara sin satisfacer una demanda igual al volumen que aparece en la tercera columna del cuadro V.9. La segunda es que con el uso de aguas subterráneas no se pudiesen aportar más disponibilidades para satisfacer esas u otras demandas. La utilización conjunta bien sea a través de la recarga artificial o la utilización alternativa como hemos presentado en la primera parte de este trabajo nos dan la posibilidad de incrementar la regulación de las aportaciones debidas a la escorrentía superficial. Negar esto es rechazar la evidencia de las realizaciones existentes en España y fuera de ella, de las que sólo hemos citado unas pocas.

También hay que tener en cuenta que debido a la gran inercia que proporciona el agua almacenada, hay un desfase entre el bombeo de los acuíferos y el tiempo que tarda en producirse un efecto significativo en el caudal de los ríos, que puede ser muy importante en acuíferos de grandes dimensiones. En la figura 5, tomada de Sahuquillo et al. (1982) reproducimos la influencia de un bombeo intermitente de seis meses a distintas distancias de los Ojos del Guadiana sobre el caudal drenado por el río. Se ve que a distancias grandes el efecto al cabo de 20 años puede ser relativamente reducido. A distancias cortas se nota el efecto de la estacionalidad, que puede ser más acusada en acuíferos de dimensiones menores, en los desfases entre los bombeos y la influencia sobre los caudales superficiales, tal como se presenta en la figura 4.

Los valores de la tercera columna del cuadro V.9 sólo podrían obtenerse con rigor a partir de modelos de simulación global de toda la cuenca en las que se incluyan los flujos superficiales, los

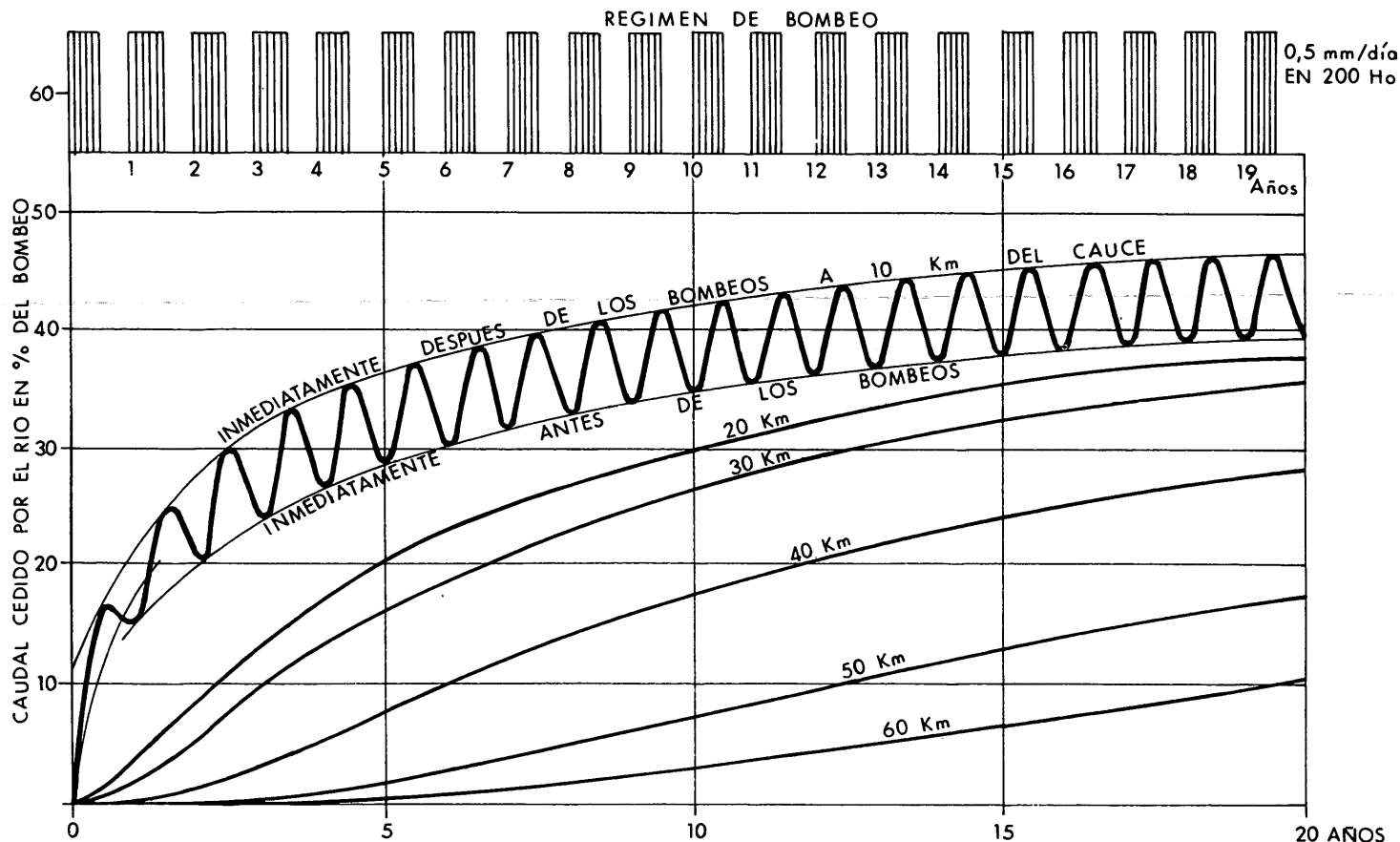


Figura 5. Curvas de influencia de extracciones sobre los caudales drenados por el río Guadiana. (Tomado de Sahuquillo et al. 1982).

acuíferos, la utilización real, los consumos, los retornos superficiales y subterráneos y las interacciones río-acuífero, todo ello con un grado de detalle suficiente e incluyendo los contrastes y validaciones adecuadas. En esquemas de alguna complejidad las ventajas que se pueden obtener de la utilización de las aguas subterráneas sólo pueden valorarse con precisión utilizando modelos de simulación adecuados (Andreu et al. 1991). En los casos que conocemos de cuencas españolas los resultados son en general favorables, o muy favorables. Pero este tipo de estudios no se han llevado a cabo de forma sistemática para el Plan Hidrológico Nacional. En cualquier caso, dada la trascendencia de las decisiones que se fundamentan en las afirmaciones de las páginas 77 y 78 y cuadro V.9 de la Memoria, deben hacerse públicos los estudios en que se basan.

Unas consideraciones sencillas prueban que estas afirmaciones son incorrectas, al menos para

la cuenca del Duero en el caso que vamos a analizar a continuación. Se trata de las aportaciones al río Duero en la estación de Carrascal con una cuenca vertiente del 59% del total de la cuenca, y tiene unas aportaciones superficiales inferiores al 40% de todo el sistema hidrográfico. Los datos que manejamos son los disponibles de los aforos entre 1962-63 y 1987-88. Son las aportaciones que pasan por la estación una vez derivados los aprovechamientos localizados aguas arriba, que en estos momentos son el 73% de toda la cuenca del Duero (MOPT 1990). La aportación subterránea de esa porción de la cuenca debe estar comprendida entre el 70 y el 80% del total de la misma. En la hipótesis que hacemos de suprimir las aportaciones subterráneas optamos por la solución más desfavorable de considerar el 80%. Si restamos esa aportación subterránea, de la que nos proporciona el resumen por meses de los anuarios de aforos tendremos algunos meses con déficit en todo el período. Si además exigimos

que circule un caudal mínimo por ese punto de 25 Hm³/mes, el número de meses con déficit aumenta. Pero el déficit medio no llega a ser de 50 Hm³/año, en vez de los casi 1200 en que hemos disminuido el drenaje de los acuíferos. La razón para esto está bien clara, desde Diciembre a Abril inclusive no habría un solo mes con déficit en todos los años analizados, solo dos años presentarían déficit en el mes de Mayo y otros dos en el de Octubre, y serían 3 los años con déficit en los meses de Noviembre y Junio. El mes en el que habría más años con déficit sería Agosto.

Al ser tan reducido el déficit, el paliarlo sería relativamente fácil. Podría hacerse bien a través de una mejor operación de los embalses del sistema, bien asignando estos déficits a alguno, o algunos, de los embalses previstos, o bien aumentando la regulación a través del concepto de utilización alternativa. Una inspección de las aportaciones de la estación indica que sería relativamente fácil conseguir mejoras con una operación adecuada de los embalses existentes, si llegase a ser necesario.

En la Tabla 1, en (1), se refleja la distribución mensual de 1193,7 Hm³ (el 80% de los 1492 Hm³/año de la tercera columna del cuadro V.9). Se hace variar entre un máximo del 125% del caudal medio en los meses de invierno, a un mínimo del 75% en el mes de Agosto. En (2) se añaden 25 Hm³ a cada mes para tener en cuenta la exigencia de satisfacer el caudal mínimo. También se reflejan las aportaciones medias, las mínimas, los años en los que se produciría déficit y los déficits medios mensuales y anual.

En la hipótesis de trabajo hemos supuesto una componente uniforme del drenaje subterráneo. En realidad en los meses de verano de los años secos sería más pequeña y mayor en los lluviosos de los años húmedos. Además no consideramos aumento de la recarga de los acuíferos si se aumentan los riegos o los retornos, ni que los acuíferos puedan incrementar la recarga desde algunos cauces con los que se ha modificado su relación. Ambas son hipótesis conservadoras.

El que se exija que por si solas las escorrentías subterráneas satisfagan las demandas existentes de abastecimiento y riego con prioridad a las superficiales es sencillamente imposible, pues se presentan mezclas. Plantear además requerimientos hidroeléctricos hace sospechar que se

quiere negar a toda costa la oportunidad de su utilización. La exigencia de no disminuir la producción hidroeléctrica haría que no se pudiera aumentar en absoluto cualquier uso consuntivo en la cuenca, ni por supuesto trasvasar a otras.

Hay que tener además en cuenta que en acuíferos de grandes dimensiones con almacenamiento grande la influencia de los bombeos sobre el caudal de los ríos puede ser pequeña aún más allá del horizonte del Plan Hidrológico Nacional. Además, las variaciones anuales e interanuales de los efectos de los bombeos se reducen lo que facilita el efecto regulador de estos bombeos.

La afirmación hecha en b) de que los volúmenes desaguados al mar en los acuíferos costeros no son utilizables sin riesgos de salinización, contradice a la experiencia existente. No puede explotarse toda, pero si un buen porcentaje de la recarga. Su utilización es además en general sumamente interesante dada la localización estratégica de casi todos estos acuíferos. Y utilizados conjuntamente con los recursos superficiales, como por ejemplo se hace en La Plana de Castellón, y en muchos más sitios, pueden contribuir decisivamente a aumentar las disponibilidades, disminuyéndose a la vez el peligro de la sobreexplotación o intrusión marina.

No se puede desechar la utilización de los acuíferos costeros por el peligro de la intrusión marina. Peligro que es cierto si se sobreexplotan o se utilizan inadecuadamente. Pero existen métodos y modelos adecuados para analizar su comportamiento, Ferrer y Ramos (1983), así como experiencia suficiente en todo el mundo. Como en el caso de los acuíferos que drenan a los ríos, el no contar con las alternativas que pueden proporcionar tiene que justificarse adecuadamente, pues con mucha frecuencia son la solución, o su componente, más barata y sencilla a los problemas de demanda de agua.

Es sorprendente que se incluyan 230 Hm³ entre las demandas que deben desaguar al mar los acuíferos costeros de la cuenca del Júcar para evitar su salinización por intrusión (cf p.66). En toda la cuenca tienen problemas los siguientes acuíferos. El de la Plana de Vinaroz, en la que algunos pozos demasiado profundos en la zona costera presentan una salinidad elevada, es un problema de localización de captaciones pero no plantea problemas de intrusión marina. El de Oro-

pesa-Torreblanca tiene salinidades elevadas, pero parece que tanto éstas como las extracciones han cambiado poco en los últimos años; en mi opinión la intrusión se produce por ascenso salino y no por penetración de frente salino y debería estudiarse con más detalle. En cualquier caso el déficit en la zona sería de unos pocos millones de metros cúbicos al año. La Plana de Castellón tiene el problema de salinización en su zona sur que se ha comentado antes así como su posible solución. El problema de intrusión más grave es el de La Plana de Sagunto en el que se sobreexplotan unos 20 Hm³/año. También hemos comentado antes sus posibilidades de solución con recursos del Río Palancia, a través de la utilización conjunta y la recarga artificial. El único problema adicional que queda es el de la salinización en la zona Denia-Javea que supone un volumen de pocos millones de metros cúbicos al año. Parece exagerado pretender resolver todos estos problemas importando aguas del Ebro en esas cantidades en vez de tratar de hacerlo con soluciones locales dadas las aportaciones no utilizadas de la cuenca, incluidas las subterráneas que se aceptan como tales en el cuadro V.9. En cualquier caso también parece necesario reclamar que se hagan públicos los estudios en los que se justifican la cifra de 230 Hm³/año.

También hay que decir que no es extraño que en parte se rectifique para el Duero y Tajo las cifras de posibilidad de aprovechamiento de las aguas subterráneas que se dan en el cuadro V.9 con las que se proponen en el V.14 de la página 98. Las posibilidades de incremento de la regulación son bastante grandes en casi todas las cuencas excepto en las del Guadiana y Segura en que la sobreexplotación es grande y quizás también por otras causas en la del Guadalquivir, aunque también tiene posibilidades interesantes. En la cuenca del Norte también parece que las posibilidades son bastante mayores que las propuestas por el P.H.N.. Aunque haya una gran disponibilidad de recursos parece que tiene que haber muchos acuíferos que por sí solos o conjuntamente con las recursos superficiales pueden resolver gran número de problemas, de forma más eficaz y económica.

Si se planifica adecuadamente la gestión de los acuíferos, realizando los análisis complementarios necesarios que incluyan modelos de utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas se pueden conseguir ventajas sustanciales y

aumentos de disponibilidades. Estos modelos deben incluir por supuesto de forma adecuada la interacción aguas superficiales-aguas subterráneas, las formas de servir la demanda y los retornos.

Otros aspectos

Otro aspecto que puede ser crucial es el de las demandas. En otra parte he mostrado mi punto de vista de que no estaba justificado el aumento de 600.000 has (Sahuquillo, 1983) en los riegos. También surgen dudas serias sobre las demandas ambientales y refrigeración que da el P.H.N., 6.598 Hm³/año. Antes he expuesto mi disconformidad con los 230 Hm³/año que se demandan para los acuíferos costeros del Júcar, como también lo hago con los 200 Hm³/año "para la recuperación y adecuado mantenimiento" (P.66) de la Albufera de Valencia en la que lo que lo fundamental es depurar y evitar los vertidos que producen su degradación. Además, si fuese preciso, el acuífero de la Plana de Valencia, y más aun conjuntamente con los recursos superficiales es susceptible de proporcionar recursos muy importantes que no se han tenido en cuenta en el P.H.N. Por último resulta absolutamente arbitraria la propuesta de trasvasar 100 Hm³/año desde el Chanza-Piedras para recargar el acuífero Almonte-Marismas. Según el Plan Hidrológico del Guadalquivir la demanda en esa zona es de 73 Hm³/año y no propugna la importación de recursos exteriores. Bien es verdad que bombeando ese volumen y aún volúmenes anuales bastante inferiores, se producirían con toda probabilidad efectos muy negativos sobre el Coto de Doñana, pero con seguridad muy inferiores a las alteraciones ecológicas que se introducirían en los niveles piezométricos en las zonas más sensibles como el ecotono, La Vera y Los Corrales, además de en todo el conjunto del Parque Nacional (Curso Internacional de Hidrología Subterránea 1991) si se recargan 100 Hm³ anuales. Una vez más se hace preciso reclamar que se hagan públicos los criterios utilizados y los estudios que justifican las decisiones adoptadas.

Conclusiones

Las aguas subterráneas, particularmente a través de la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas, pueden contribuir a un aumen-

TABLA I.
Análisis de déficits en estación de Aforos Nº 66 Cuenca del Duero, para desaparición de aportaciones subterráneas y 25 Hm³/mes caudal mínimo.

PERIODO 1962-63 a 1987-88

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
(1) Dren Sub Hm3	84.6	99.5	109.4	124.3	124.3	119.4	109.4	94.5	89.5	84.6	79.6	74.6	1193.7
(2) D.S+ 25 Hm3	109.6	124.5	134.4	149.3	144.4	134.4	119.5	114.5	109.6	109.6	104.6	99.6	1493.7
C.Medio Hm3	190	276	356	544	658	602	478	408	265	133	96	121	403.6
C.Mínimo Hm3	84	78	135	150	183	200	140	103	64	44	24	52	
Años con Déficit	2	3	0	0	0	0	0	2	3	10	14	10	
Déficit medio	1.3	2.5	--	--	--	--	--	0.7	4.25	13.3	17.7	9.5	49.25

(1) Drenaje subterráneo Hm³/mes, (2)(1) + 25 Hm³/mes

to importante de las disponibilidades de agua y a la protección de su calidad, y en muchas ocasiones proporcionar soluciones que alteren menos el medio ambiente. Las inversiones necesarias se podrían disminuir de forma importante y se pueden conseguir aumentos en la garantía y la robustez de los sistemas. Esto último es sumamente importante ante las incertidumbres y dificultades económicas y ante lo incierto o discutible de las demandas que propone satisfacer el P.H.N.. Además están las incertidumbres tecnológicas e hidrológicas que inevitablemente existen en un proyecto de dimensiones nacionales incluyendo los relativos al cambio climático global.

Una de las alternativas de aumentar la regulación que deberían estudiarse de forma obligada, para hacer frente a los aumentos de la demanda, antes de proceder a la construcción de nuevos embalses, es la de utilizar conjuntamente acuíferos poco explotados con los elementos superficiales de regulación y transporte existentes.

Es muy conveniente que se abran debates técnicos y científicos para discutir las distintas opciones y contribuciones que puedan contribuir a la mejora del P.H.N.. Esta es una razón más para que se hagan públicos los estudios realizados hasta ahora y los que se vayan terminando.

Un aspecto importante no analizado en este artículo es el de la conservación de la calidad del agua subterránea y la prevención de la contaminación, aspectos sumamente importantes descuidados, en la política hidráulica actual y en el Plan Hidrológico Nacional. En mi opinión, tal como está redactado debe ser modificado drásticamente. Y no porque las herramientas técnicas utilizadas sean poco avanzadas, ni siquiera por ser fundamentalmente un plan de obras y no un plan de recursos hidráulicos; sino porque entre sus objetivos es marginal uno, tan crucial al final del siglo XX, como es el de mantener la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, preservarlas de la contaminación y mantener el medio ambiente hidráulico a salvo de esta, (Sahuquillo 1994).

Referencias

- Andreu, J. (Ed.) 1993. "Conceptos y métodos para la Planificación Hidrológica". Ed. C.I.M.N.E. Barcelona.
- Andreu, J.; J.Capilla y E. Sanchis (1991). "A Computer Assisted Support System for Water Resources Research Management Including Conjunctive Use". In Decision Support Systems in Water Resources Planning, ed D.P.Loucks y J.R. da Costa. Reidel pp. 333-356.

- Andreu, J. et A. Sahuquillo, 1987. "Efficient Aquifer Simulation in Complex Systems". *Journal of the Water Resources Planning and Management Division, ASCE*, vol. 113, nº 1, pp. 110-129.
- Bredehoeft, J.D. and R.A. Young, 1983. "Conjunctive Use of Groundwater and Surface Water for Irrigated Agriculture: Risk Aversion". *Water Resources Research*, Vol. 19, nº 5, pp. 1111-1121.
- California State Department of Water Resources, 1957. *The California Water Plan*, Bull. nº 3.
- Confederación Hidrográfica del Júcar, 1991. "Planificación de la Cuenca del Río Mijares".
- Curso Internacional de Hidrología Subterránea, 1991. "Revisión crítica de los trabajos existentes de modelación del flujo subterráneo en el acuífero circundante al Parque Nacional de Doñana". Con la colaboración de la Universidad Politécnica de Cataluña y la Universidad Politécnica de Valencia.
- Custodio, E., F. Cacho, M. Suárez, F.J. Isamat and J.M. Miralles, 1977. "Combined Use of Surface and Groundwater in Barcelona Metropolitan Area (Spain).- Inter. Assoc. Hydrogeologists, Birginingham, vol. XIII, po. C 14-27.
- Downing, R.A., D.B. Oakes, W.B. Wilkinson and C.E. Wright, 1974. "Regional Development of Groundwater Resources in Combination with Surface Water". *Journal of Hydrology*, 22 (1974), pp. 174-177.
- Ferrer, J. y F. Ramos (1983). "Simulation of saltwater-freshwater interface motion". *Water Resources Research* 19(1), pp. 61-68.
- Hashimoto, T., D.P. Loucks and J.R. Stedinger, 1982. "Robustness of Water Resources Systems". *Water Resources Research*. Vol. 18, nº 1, pp. 21-26, February, 1982.
- López-Camacho y Camacho, B. y M. Varela, 1983. "El modelo de utilización conjunta de la provincia de Madrid.". En *Utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas*. Valencia y Castellón de la Plana. S.G.O.P.- M.O.P.U. y Universidad Politécnica de Valencia. Ed. M. Varela.
- Mandel, S., 1967. "Underground Water.- Inter. Scinece and Tech. nº 66, pp. 35-41.
- Monzonis, 1988. "Estudio paramétrico de la utilización conjunta de un embalse superficial y un acuífero". Trabajo fin de carrera. E.T.S.I. de Caminos. Universidad Politécnica de Valencia.
- Sahuquillo, A., J. López García y B. López Camacho, 1982. "Transient unidimensional digital model to simulate responses of an aquifer related with a wetland ecosystem". *Computers in Simulation XXIV* pp. 161-172. North Holland Publ. Comp.
- Sahuquillo, A., 1993. "Papel de los acuíferos en la regulación de los recursos hidráulicos". En *Jornadas sobre las aguas subterráneas*. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales e I.T.G.E. En prensa.
- Sahuquillo, A. 1994. "Protección, detección y control de la contaminación de acuíferos". Congreso Nacional sobre Analisis y Evolución de la Contaminación de las Aguas Subterráneas. Ponencia General, sección 1. Alcalá de Henares 7-10 de Febrero de 1994 (En prensa).
- Sánchez, A., 1986. "Criterios para la evaluación del coste del agua en Madrid". *Jornadas sobre la Explotación de Aguas Subterráneas en la Comunidad de Madrid*. Canal de Isabel II, 1986.
- Schwarz, J., 1980. "A Systems Approach to the Strategy on Integrated Management of Surface and Groundwater Resources". In: *Water Quality Management under Conditions of Scarcity, Israel as a Case Study*. H.I. Shuval Editeur. Academic Press.
- Skinner, A., 1983. "Groundwater Development as an Integral Part of River Basin Resource Systems. Groundwater in Water Resources Planning". UNESCO-IAH-IAHS, Koblenz, Federal Republic of Germany, 28 August-3 September, 1983.