

EXPERIENCIAS EN PROBLEMAS DE REGULACION DE CAUDALES Y MAXIMAS CRECIDAS

Por RAFAEL HERAS

Prof. Dr. Ing. de C., C. y P.

Para la óptima, o al menos racional utilización de los recursos hidráulicos de una cuenca, región o país, se requiere un inventario aceptable de datos hidrológicos y un conocimiento suficiente de la hidrología de la cuenca, que deberá ser más ajustado cuanto mayor sea el porcentaje de utilización de los recursos hidráulicos disponibles.

El estudio hidrológico se referirá, tanto a recursos superficiales como subterráneos, e incluso a otras posibilidades de la tecnología actual, con el objetivo primordial de establecer los estudios básicos para el aprovechamiento integral de los recursos hidráulicos. Los dos temas más importantes del estudio son el de la regulación y el de máximas crecidas, puesto que estos dos temas son los que más directamente condicionan los proyectos, las obras y la posible explotación óptima de un sistema hidráulico. Se completan los problemas más importantes de estos dos temas, sintetizando la metodología de cálculo de regulación de un embalse o sistema de embalses y también la correspondiente al estudio completo de máximas crecidas.

I. LOS RECURSOS HIDRAULICOS EN ESPAÑA

España, en su conjunto, no puede considerarse como un país seco, dentro del contexto mundial. La escorrentía media total superficial y subterránea es de unos 110.000 hectómetros cúbicos por año para una superficie de cerca de 500.000 Km², lo que supone una escorrentía específica de unos 220 mm por año. Esta cifra es inferior a los 300 milímetros, que representa tanto la media europea como la media mundial.

Para la población actual, unos 35 millones de habitantes, los recursos naturales totales suponen unos 3.150 m³/hab./año, y para la previsión a principios del siglo venidero, de unos 52 millones de habitantes, supondrían unos 2.100 metros cúbicos por habitante y año, cifras que resultan tranquilizadoras, si se tiene en cuenta que en los Estados Unidos de Norteamérica la derivación de agua por habitante para todos los usos resulta, tanto hoy como en las previsiones futuras, del orden de 1.300 m³/hab./año, cifra que podría considerarse como un techo satisfactorio de demanda, para un nivel medio de vida adecuado.

Sin embargo, la fuerte irregularidad de las cuencas españolas ha obligado desde principio de siglo a una serie de estudios, experiencias, proyectos y obras cuyos resultados pueden ser útiles a otros países. Todas las características hidrológicas españolas se resumen en el cuadro de la página siguiente.

II. LA REGULACION DE LOS RIOS

Un proyecto de utilización de Recursos Hidráulicos requiere, en la primera fase del estudio, un conocimiento

suficiente de la hidrología de la cuenca; por otra parte, y a medida que avanza el desarrollo de la utilización de los recursos hidráulicos, se necesita una metodología más ajustada, puesto que el dimensionamiento de la presa es el resultado de aspectos puramente técnicos, condicionantes de explotación e incluso de motivaciones económicas y sociales.

Debe tenerse además muy en cuenta que, a partir de la última década se estudia siempre la utilización de los recursos totales de una cuenca, región o país, y se trata de optimizar el aprovechamiento integral de los recursos. Es evidente, además, que los estudios hidrológicos se plantearán de manera muy diferente cuando se trate de utilizar un porcentaje importante de los recursos de la cuenca que cuando se necesite únicamente un porcentaje pequeño de regulación. En el primer caso se necesitará una alta garantía de los estudios y, por tanto, de la metodología a emplear, mientras que en el segundo pueden ser válidos, e incluso más racionales, una serie de métodos más sencillos, aunque tengan una menor garantía.

El estudio hidrológico completo comprenderá la hidrología general de la cuenca, un estudio de aguas superficiales, un estudio de aguas subterráneas y se completará siempre, aunque en otro orden de magnitud, con un estudio de demandas, erosión, arrastres y sedimentación. En general, el estudio de aguas superficiales y subterráneas se realizaría paralelamente para establecer el balance hidrológico de las cuencas parciales y totales y tratar de definir, como ya se ha citado, el aprovechamiento integral de los recursos totales de la cuenca.

Lógicamente, los porcentajes de posible utilización de

Cuenca	Superficie (Km ²)	Superficie directa	A través de infil- tración subte- rránea	Drenada subterr- neamente de forma directa al mar	Total	Aporta- ción (Hm ³ por año)	Esco- rrentia (cm)	Porcen- taje de la esco- rrentia media	Aporta- ción del año más seco As (Hm ³ por año)	Volumen regulado natural (Hm ³ /año)	
										Regimen uniforme	Regimen variable
Norte	54.829	33.100	4.100	1.500	37.200	37.200	67.8	315	16.200	2.550	940
Duero	78.056	14.450	1.450	—	15.900	15.900	20.3	95	5.550	840	350
Tajo	55.769	8.050	2.200	—	10.250	10.250	18.4	85	750	360	125
Guadiana	59.873	4.350	700	50	5.050	5.050	8.4	39	200	10	5
Guadalquivir	63.085	7.100	2.100	200	9.400	9.400	14.5	67	1.000	920	405
Sur	18.391	1.800	450	440	2.250	2.250	12.2	57	550	50	20
Segura	18.631	450	500	10	950	950	5.1	24	450	130	60
Júcar	42.904	2.600	1.200	1.300	3.800	3.800	8.8	41	1.350	710	320
Ebro	86.098	15.800	3.050	100	18.950	18.950	21.9	102	8.000	3.460	2.145
Prineo Oriental	16.493	2.300	250	700	2.250	2.550	15.4	71	750	160	75
Totales	494.129	90.000	16.000	4.300	110.300	106.000	21.5	100	34.800	9.190	4.445
Islas Canarias	7.500				550		0.20				
Islas Baleares	5.000				350		0.12				

aguas superficiales y subterráneas influirían decisivamente en el planteamiento del estudio, aunque, en cualquier caso, el resultado final se referirá al conjunto de los recursos existentes.

El estudio hidrológico de aguas superficiales comprenderá todos aquellos puntos necesarios para la determinación de la serie de caudales en el embalse o embalses a estudiar, siendo sustancialmente importante la extensión y garantía de las series estimadas a partir de los datos hidrológicos de la cuenca. En general, pueden presentarse tres casos: que exista serie de caudales en el punto o puntos a estudiar, que no exista, pero que pueda utilizarse otra serie de cuencas o cuencas afines hidrológicamente, y que no exista ninguna serie de caudales, que pueda utilizarse en el estudio y haya que realizar el estudio a partir de datos de precipitaciones.

En cualquiera de los tres casos la metodología de cálculo es análoga, aunque habría que realizar algunos estudios específicos complementarios en el segundo y tercer casos, y los resultados tienen, como es lógico, menor garantía cuando no existen series de caudales.

El estudio hidrológico de aguas subterráneas tiene una metodología muy diferente, aunque con la tecnología actual es posible llegar, en algunos casos, a un conocimiento casi tan completo como el de las aguas superficiales, aunque estaría condicionado fundamentalmente por la falta de series suficientemente extensas. Por otra parte, y aunque en el estudio de aguas superficiales es absolutamente necesario un conocimiento *in situ* de la cuenca y de sus características hidrológicas generales, en el caso de aguas subterráneas se necesitaría un estudio de campo mucho más completo, sobre Geología, Geomorfología y Geohidrología.

Para el estudio de aguas superficiales deberán analizarse una serie de características físico-geográficas de la cuenca, que se completarán con el estudio climatológico y meteorológico, cuya conclusión es una serie de índices de todas las variables a considerar. El estudio de precipitaciones se realiza a escala mensual y anual para determinar sus características por cuencas parciales, incluyendo leyes de distribución, y escalas de tiempo más pequeñas para el estudio de máximas crecidas y determinación de consumos. Paralelamente se realiza el estudio de caudales a escala anual y mensual, para definir las series que se utilizarán en los estudios de regulación.

Estudio de regulación.—El objetivo es la determinación de la capacidad óptima del embalse o cada uno de los embalses considerados; en este segundo caso, individualmente y como sistema y a efectos únicamente hidrológicos, completados posteriormente con estudios geológicos-topográficos y económicos.

En los estudios previos de regulación deben calcularse siempre las curvas capacidad-caudal regulado, tanto para demanda continua como para demanda variable, y para diversas hipótesis de garantía, mediante el cálculo de las leyes de distribución de la serie de aportaciones anuales en el embalse o embalses a estudiar, que nos permiten deducir las diversas garantías teóricas a partir de la serie

cronológica utilizada y los años de las mismas que no deben considerarse en el cálculo de las curvas de regulación en cada hipótesis, es decir, no considerando aquellos años cuya frecuencia, deducida de la curva de distribución ajustada, corresponda a las diversas hipótesis de garantía estudiadas, hipótesis aceptable si se considera que en los años no utilizados para el cálculo de dichas curvas se complementan las dotaciones con otras fuentes de caudales.

En síntesis, la metodología a emplear sería la siguiente:

a) Se calculan las curvas de regulación interanual por el método de las diferencias acumuladas, para caudales continuos o consumos variables, con el fin de estimar los intervalos de variación de las capacidades óptimas en cada punto y poder realizar posteriormente el estudio de regulación en toda la cuenca.

b) Se calculan, estadística o gráficamente, las leyes de distribución de las aportaciones anuales en todos los puntos. Estas curvas de distribución nos permiten deducir, para diversas garantías, los años que no deben considerarse en el cálculo de las curvas de regulación en cada hipótesis. Para el cálculo de dichas curvas, con diversas garantías, admitimos no considerar en el cálculo aquellos años cuya frecuencia, deducida de la curva de distribución, corresponda a las diversas hipótesis de garantía estudiadas.

c) A partir de estos estudios se determinan los intervalos de variación de las capacidades óptimas de cada embalse, individualmente y como conjunto, y se establecen las hipótesis de cálculo para el estudio óptimo de regulación. Las capacidades de cada embalse estarán condicionadas también por la geología, topografía y coste de la presa.

d) Se establece la regulación sucesiva de los distintos embalses considerados y con diferentes hipótesis de capacidad, suponiendo que cada embalse se utiliza primeramente para regular la aportación de la cuenca propia, empleándose las capacidades diferenciales en regular, sucesivamente, los caudales no regulados aguas arriba; como resultado se obtienen los volúmenes regulados por cuencas parciales y totales para diversas hipótesis de garantía. Con este proceso iterativo, para diferentes hipótesis de capacidad, se establecen los intervalos de variación de las capacidades óptimas en cada uno de los embalses.

e) Se realiza el estudio analítico de regulación en cada punto teniendo en cuenta evaporación, capacidades útiles, etcétera, a partir del cual y en función también de los criterios de explotación, se fijan las capacidades de cada uno de los embalses, realizándose el estudio analítico completo, para cada uno de los embalses, de la regulación con la serie histórica, y con este estudio se definen las capacidades a considerar en cada embalse.

Finalmente, se realizará un estudio estadístico completo por el método del tipo regulación-explotación para cada embalse y para el sistema conjunto. Este sistema de cálculo computa los niveles de garantía de utilización en función de los valores de explotación que entran en el cálculo,

como datos del problema. A partir de la serie a escala mensual en cada uno de los embalses y para poder tener el concepto de garantía de explotación estadísticamente, requiere la simulación de un modelo hidrológico mediante una serie artificial, suficientemente extensa, de años hidrológicos simulados, haciendo la hipótesis de que son variables aleatorias independientes o condicionándola, por ejemplo, por el grado de autocorrelación en series simuladas. La extensión de las series simuladas suele ser del orden de quinientos a mil años, y es necesario definir la máxima demanda a efectos de introducirla a la escala mensual del modelo de cálculo, fijando además a cada embalse un factor de explotación, porcentaje de la aportación media considerada para cada hipótesis de consumo. El concepto de garantía agrícola se define por la relación entre el número de años no insuficientes y la extensión de la serie. En general, año insuficiente se define como aquel que tiene un cierto número de meses insuficientes, aportaciones utilizables menores que consumos, mayor que un número dado, normalmente 3 ó 4, y considerando además que es insuficiente cuando, aunque el número de meses citados anteriormente sea inferior al fijado, la cantidad de agua utilizada en esos meses es menor de un cierto porcentaje de la demanda teórica, normalmente del orden del 75 por 100. Como resultado del cálculo se obtienen las curvas de tanto por ciento de porcentaje de aportación utilizada y tanto por ciento de garantía.

Experiencia española.—Partiendo de la premisa de que no sería lógico condicionar el desarrollo de los recursos hidrológicos o de series hidrológicas con un mínimo de extensión para poder plantear el estudio con una cierta garantía, el estudio hidrológico deberá ser en cualquier caso, lo más completo posible y utilizar, además del método convencional, las tecnologías más modernas en este campo, fundamentalmente la utilización de modelos de todo tipo, pero poniendo un interés especial en considerarlos como una herramienta de trabajo utilizada para aumentar las posibilidades de información del proyectista. Nuestra experiencia en utilización de modelos es que deben emplearse por fases, puesto que los grandes modelos *input-output* no tienen ningún sentido físico para el problema que se plantea en un estudio hidrológico y sus resultados no tienen en absoluto ninguna garantía.

Considerando, y según la experiencia española, las distintas etapas del desarrollo hidráulico en la primera de las cuales hay abundancia de recursos disponibles en cada cuenca frente a la demanda y un bajo porcentaje de utilización, es decir, que se trata de estudios específicos y concretos sin intentar relacionarlos con el conjunto. En general, puede considerarse esta etapa como de utilización de hasta un 50 por 100. En la segunda, que llega hasta una utilización del 75 por 100 de los recursos, habría que tener en cuenta la interdependencia del sistema o sistemas y el estudio integral y conjunto de las aguas superficiales y subterráneas, y en la tercera etapa, que se presenta cuando la demanda, dentro de la unidad hidrológica, resulta igual al factor de disponibilidad de recursos propios, será necesario plantear el aprovechamiento conjunto y, por

tanto, ampliar el marco geográfico y metodológico de los estudios hidráulicos.

Lógicamente, y aunque los planteamientos hidrológicos generales sean los mismos, habría que tener muy en cuenta la metodología empleada, la etapa de desarrollo hidrológico, para completar los estudios de tipo general con estudios más especializados e incluso más sofisticados, puesto que el grado de garantía, o lo que es lo mismo, el porcentaje de error en la aproximación hidrológica tiene muy diferentes influencias, según sea el porcentaje de los recursos que quieran regularse.

III. DISPONIBILIDADES ACTUALES Y FUTURAS

Aguas superficiales.—Como ya se ha indicado, uno de los problemas más fundamentales del aprovechamiento del agua en España es la necesidad de regular mediante embalses los caudales naturales para asegurar una permanencia en el suministro. Esto es debido a que:

a) La mayor parte de la escorrentía de nuestros ríos se produce durante el invierno y la primavera, que es cuando las necesidades del mayor consumidor de agua (el regadío) son mínimas.

b) La escorrentía varía fuertemente de un año a otro, siendo la aportación mínima global del país una tercera parte de la media.

Para resolver el primer aspecto desfavorable, reseñado en forma estricta, bastaría con establecer embalses capaces de acomodar anualmente el régimen natural a las demandas, con lo que se lograría disponer de la tercera parte de los recursos naturales aproximadamente. Sin embargo, este techo de disponibilidades resulta reducido para el futuro considerando las demandas previsibles, y para incrementarlo es preciso ir a la regulación interanual con grandes capacidades de embalse.

En definitiva, resulta que con la regulación natural en España se podría aprovechar solamente entre el 5 y el 10 por 100 de los recursos naturales; con la regulación anual se llegaría hasta un límite del 33 por 100, aproximadamente, y para sobrepasar este límite hay que acudir a la regulación interanual, cuyo techo es variable con el tiempo y depende de factores esencialmente económicos.

De los resultados globales expuestos se deduce claramente que la economía hidráulica española en la moderna coyuntura depende esencialmente de sus embalses reguladores, reto de la naturaleza que recogió hace muchos años el ingeniero hidráulico español.

Aguas subterráneas.—Como disponibilidades de aguas subterráneas se consideran, en cada momento, las que se utilizan para los diversos usos, pues los potenciales teóricos de utilización de los embalses subterráneos (ya construidos por la naturaleza) requieren labores de captación para su utilización, que pueden considerarse equivalentes a las de regulación de recursos superficiales mediante embalses.

No son muy completos los datos de que se dispone en España sobre la utilización de aguas subterráneas, pero sí

suficientes para dar una visión panorámica de alcance global representativo.

En materia de regadíos la superficie total de la España peninsular que utiliza agua de pozos puede estimarse en unas 540.000 Ha, con una dotación media de unos 5.700 metros cúbicos por hectárea y año.

En cuanto a abastecimientos podría estimarse, con cierto margen de error, que la demanda industrial y urbana se cubre en una tercera parte, aproximadamente, con recursos de dicha procedencia.

Con las naturales reservas que aconsejan una estimación con escasos datos, pueden evaluarse las demandas abastecidas con aguas subterráneas y su distribución previa entre acuíferos, de la forma que se indica.

DEMANDAS ABASTECIDAS CON AGUAS SUBTERRANEAS

Cuenca	Demanda abastecida con aguas subterráneas (Hm ³ /año)			Distribución previa entre acuíferos (Hm ³ /año)	
	Riegos	Abastecimientos	Total	Interiores	Costeros
Norte	300	60	360	—	360
Duero	400	35	435	435	—
Tajo	200	135	335	335	—
Guadiana	260	100	360	360	—
Guadalquivir	200	35	235	235	—
Sur	300	95	395	110	285
Segura	350	15	365	355	10
Júcar	610	260	870	60	810
Ebro	240	45	285	285	—
Pirineo Orient.	200	250	450	—	450
Totales	3.060	1.030	4.090	2.175	1.915

Las hipótesis previstas para el futuro en lo que se refiere a regulación superficial sin considerar posibles afecciones de extracción de aguas subterráneas, se sintetizan en el cuadro de la página siguiente.

Puede observarse que existe todavía margen para poder conseguir incremento de regulación en muchas cuencas, salvo las del Tajo y Segura, que quedan fuertemente reguladas. Como ejemplo citaremos los estudios más recientes sobre el Pirineo Oriental y Ebro. Para el Pirineo Oriental se ha llegado a la cifra de disponibilidades futuras de 1.552 Hm³/año procedentes de aguas superficiales, lo que supone un 35 por 100 más que la estimada en el Inventario, y para la cuenca del Ebro se ha considerado que puede ser físicamente factible llegar a 16.000 Hm³/año, lo que supondría más del 85 por 100 de los recursos naturales de la cuenca.

La gran reserva hidráulica de la Península (norte de España), que dispone de la tercera parte de los recursos naturales, presenta un grado de regulación reducido, debido a que los estudios realizados hasta el presente se

DISPONIBILIDADES FUTURAS DEL INVENTARIO

Cuenca	Aportación media (Hm ³ /año)	Capacidad embalse (Hm ³)	Volumen regulable V (Hm ³ /año)		Grado de regulación $\frac{V}{A_m} \cdot 100 (\%)$	
			Regimen uniforme	Regimen variable	Régimen uniforme	Régimen variable
Norte	37.200	9.108	15.461	10.379	41,5	27,8
Duero	15.900	11.550	10.383	8.704	65,3	54,8
Tajo	10.250	15.345	8.420	7.679	82,1	75,0
Guadiana	5.050	8.233	2.729	2.584	54,1	51,2
Guadalquivir	9.200	7.926	4.902	4.313	53,3	46,9
Sur	2.250	1.615	1.082	982	48,1	43,6
Segura	950	1.153	758	721	75,8	82,3
Júcar	3.800	4.058	2.635	2.404	69,3	63,3
Ebro	18.850	9.435	13.734	11.137	73,0	59,2
Pirineo Oriental.	2.550	1.315	1.150	1.087	45,1	42,6
Totales	106.000	69.738	61.254	49.990	57,8	47,2

concretan a atender las demandas de usos consuntivos propios (fundamentalmente abastecimientos) y al desarrollo del potencial hidroeléctrico. Con vistas a un aprovechamiento integral de los recursos del país, con transferencias a otras cuencas de estos abundantes excedentes, será preciso abordar el estudio de su regulación completa, que se verá facilitada con las modernas técnicas de reversibilidad para la producción de energía de puntas, regulando por bombeo en las cuencas colindantes (Ebro y Duero) los recursos de la cordillera Cantábrica, en primera fase para el propio abastecimiento de Santander, Vizcaya y Guipúzcoa, cuyo control por medio de embalses en las cuencas propias resulta económicamente muy difícil, y

quizá en fases posteriores para aumentar las disponibilidades del país como un conjunto, incluyendo en este caso la divisoria astur-leonesa, cuyos problemas a corto plazo no son tan perentorios como los de otras regiones costeras mencionadas.

En cualquier caso, las disponibilidades futuras que el inventario recoge suponen una cifra respetable, cerca del 60 por 100 de las aportaciones naturales, con un incremento sobre las actuales de unos 15.000 Hm³/año. Esto, unido a las perspectivas de aumento de disponibilidades que los estudios específicos por cuencas han de proporcionar indudablemente, pone de manifiesto la importante tarea que todavía es preciso realizar en materia de regu-

PERSPECTIVAS DE REGULACION

Cuenca	Incremento capacidad embalse (ΔC en Hm ³)	Incremento volumen regulado (ΔV en Hm ³ /año)		Rendimiento regulación futura $\frac{\Delta V}{\Delta C}$	
		Régimen uniforme	Régimen variable	Régimen uniforme	Régimen variable
Norte	5.157	5.707	5.053	1,105	0,980
Duero	4.485	2.014	2.368	0,448	0,528
Tajo	5.508	1.341	1.417	0,244	0,257
Guadiana	5.104	1.292	1.265	0,253	0,248
Guadalquivir	3.226	1.259	1.348	0,391	0,418
Sur	1.003	680	628	0,677	0,625
Segura	270	129	170	0,477	0,629
Júcar	1.356	362	549	0,267	0,404
Ebro	3.558	1.525	2.130	0,428	0,599
Pirineo Oriental	806	461	480	0,572	0,596
Totales	30.473	14.770	15.408	0,484	0,505

lación de caudales para conseguir el aprovechamiento integral de la parte más importante de los recursos naturales constituida por las aguas que circulan por nuestros ríos.

De todas formas es preciso hacer notar que el rendimiento medio de la regulación superficial va a descender sensiblemente, y no puede pensarse en seguir consiguiendo cifras tan favorables como las obtenidas hasta ahora, que suponen en conjunto un metro cúbico de embalse. De cara al futuro las perspectivas que se deducen del Inventario pueden resumirse de acuerdo con las cifras que se presentan en el cuadro de la página anterior.

El rendimiento para la regulación adicional varía entre la cuarta parte de un metro cúbico regulado por cada metro cúbico de embalse en las cuencas del norte. La media resulta de medio metro cúbico de agua regulada por cada metro cúbico de embalse, o lo que es igual, un rendimiento global del conseguido hasta ahora. Esto es lógico, pues los recursos naturales son cada vez más difíciles de regular a medida que se va avanzando en el porcentaje de su aprovechamiento, pues hay que intentar regularizar aquellos recursos que provienen de lluvias y tormentas cada vez más espaciadas en el tiempo y que es preciso retener durante periodos más largos.

IV. LA DEMANDA DE AGUA EN ESPAÑA Y SU EVOLUCION

Regadíos.—España tiene una gran tradición en el aprovechamiento de las aguas, ya que la inadecuada distribu-

ción de las precipitaciones ha obligado a ejercer la práctica del riego en la mayor parte del país para completar las insuficientes dotaciones que a los cultivos proporciona la Naturaleza. La práctica del riego en España es tan antigua como su propia historia. Todos los pueblos invasores, romanos, godos y musulmanes, dedicaron especial atención al aprovechamiento de las aguas, pero el desarrollo más floreciente se alcanzó con la invasión musulmana, pueblo verdaderamente maestro en la técnica del riego de aquel tiempo, pudiendo considerarse como origen de nuestros aprovechamientos hidráulicos perdurables los agrícolas creados por los árabes, origen de las ricas y fecundas vegas de Granada, Murcia, Valencia y Aragón.

A lo largo de los años la iniciativa privada en materia de regadíos fue creciendo paulatinamente, llegándose a utilizar caudales muy superiores a los garantizados de forma natural antes de iniciarse la construcción de presas de regulación de cierta entidad, a costa, como es lógico, de una inseguridad grande en el suministro de las dotaciones. Este aprovechamiento más que integral de los recursos en su forma natural, realizado principalmente en las zonas con tradición de regadío, ha contribuido muy eficazmente a que gran parte de la población regante aprecie en su justo valor el agua y sepa administrarla de forma adecuada. Como confirmación a lo expuesto, baste decir que a principios de siglo el regadío español superaba el millón de hectáreas, disponiéndose de una capacidad de embalse inferior a los 100 Hm³, lo que no permitía abastecer las demandas ya creadas con una garantía mínima aceptable.

EVOLUCION DE LA DEMANDA DEL RIEGO

Año	1942	1952	1962	1972	1975
Superficie (Ha)	1.100.000	1.250.000	1.500.000	2.000.000	2.150.000
Demanda (Hm ³ /año)	11.000	12.300	14.300	18.600	20.000
Consumo (Hm ³ /año)	8.500	9.600	11.400	14.900	16.000

REGADIOS EN EXPLOTACION

Con aguas derivadas de cursos fluviales			Con aguas alumbradas		Totales	
Cuenca	Ha	Hm ³ /año	Ha	Hm ³ /año	Ha	Hm ³ /año
Norte	34.100	280	50.000	300	84.100	580
Duero	288.100	2.460	70.000	400	358.100	2.860
Tajo	138.500	1.170	35.000	200	173.500	1.370
Guadiana	149.600	1.430	46.000	260	195.600	1.690
Guadalquivir	344.900	3.730	35.000	200	379.900	3.930
Sur	103.300	855	52.000	300	155.300	1.155
Segura	122.500	1.005	62.000	350	184.500	1.355
Júcar	221.900	1.970	112.000	610	333.900	2.580
Ebro	712.200	6.730	42.000	240	754.200	6.970
Pirineo O.	37.000	330	36.000	200	73.000	530
Totales	2.152.100	19.960	540.000	3.060	2.692.100	23.020

REGADIOS POTENCIALES

Cuenca	Superficie (Ha)	Demanda (Hm ³ /año)
Norte	105.600	720
Duero	813.700	6.900
Tajo	405.400	3.300
Guadiana	346.000	3.095
Guadalquivir	547.300	5.780
Sur	191.200	1.450
Segura	442.000	3.350
Júcar	503.200	3.990
Ebro	1.481.000	12.590
Pirineo Oriental	129.800	790
Totales	4.965.200	41.965

Abastecimientos.—El Plan Nacional de Abastecimientos y Saneamientos incluye datos suficientes a partir de 1960, resultando relativamente sencillo extrapolar hasta 1940 los valores de demandas y consumos disponiendo de la evolución de la población. Con un grado de aproximación parecido con el que se ha establecido la evolución de los regadíos, puede establecerse la de los sistemas de abastecimiento, como se ha efectuado en el cuadro siguiente:

EVOLUCION DE LA DEMANDA DEL ABASTECIMIENTO

Año	1942	1952	1962	1972	1975
Población					
(10 ⁶ hab.)	26,0	28,5	31,0	35,0	36,5
Demanda					
(Hm ³ /año)	1.600	1.850	2.100	3.200	3.385
Consumo					
(Hm ³ /año)	400	450	500	800	850

Otros usos.—Hasta hace relativamente poco tiempo las demandas que se consideraban para establecer los programas de regulación conducentes a incrementar las disponibilidades eran las correspondientes a los usos consuntivos de riego y abastecimiento, que siguen siendo hoy en día los componentes principales del sector de la demanda. Sin embargo, han ido adquiriendo importancia cada vez más acusada otros aspectos de las necesidades en la vida moderna, tales como las de refrigeración de centrales térmicas o nucleares, las ecológicas y ambientales y las de carácter recreativo.

En relación con las primeras cabe señalar que su magnitud cara al futuro se perfila muy importante, dada la creciente demanda de energía y las limitaciones que ofrece el potencial hidroeléctrico desarrollable. Dada la limitación de recursos de agua dulce y las crecientes demandas del mismo, resulta muy aconsejable la localización costera de

las centrales térmicas clásicas y nucleares para utilizar agua de mar en los circuitos de refrigeración. En caso necesario de localización interior debe hacerse en zonas con aguas abundantes y estudiando con detalle y sentido económico los problemas a que pueda dar lugar la reutilización de dichas aguas, o los problemas de prioridades que se puedan plantear.

Las necesidades ecológicas y recreativas entran dentro del concepto moderno de caudales mínimos que es preciso respetar en los cauces. Dentro de este apartado entra incluso el aspecto estético, que se considera recientemente como parte integrante de la demanda de agua de carácter ambiental.

No existe, por el momento, ningún criterio claro que permita establecer la cuantía de estos caudales mínimos, aunque es preciso reconocer que se trata de un problema complicado en el que influyen muchos factores, siendo uno de los más importantes desde el punto de vista cuantitativo el grado de contaminación de los vertidos. Sin embargo, esta contaminación debe de considerarse como un aspecto transitorio de la demanda de agua regulada, pues para el planteamiento de un aprovechamiento integral a largo plazo parece lógico suponer que el problema de la contaminación ha de atajarse mediante el tratamiento adecuado de dichos vertidos, de forma que no se deterioren los recursos disponibles aguas abajo y que sea posible su ulterior utilización. Partiendo de esta base los caudales mínimos podrían estimarse suponiendo que la calidad del agua mantiene, en general, condiciones próximas a las naturales.

V. ESTUDIO DE MÁXIMAS CRECIDAS

El problema de las máximas crecidas.—La existencia de un gran número de procedimientos de cálculo de crecidas de proyecto, sin que ninguno de ellos haya sido adoptado unánimemente, indica la magnitud y complejidad del problema que se enfrenta y las diferentes actitudes o posiciones, a menudo contradictorias, que los especialistas sostienen a este respecto. Ello es consecuencia, por una parte, de la reducida extensión de las series hidrometeorológicas utilizables, así como de su falta de precisión, particularmente para valores extremos y, por otra, de la oposición de criterios y resultados que supone la consideración de los dos elementos primordiales ligados al proyecto de toda obra: seguridad y economía.

Las máximas crecidas tienen una gran importancia para el proyecto de las presas, tanto por lo que afecta a la seguridad de las mismas como por las modificaciones perjudiciales que los embalses pueden introducir en el régimen natural de las avenidas. Es preciso prestar la máxima atención a estos dos aspectos:

a) Máxima crecida de cálculo que debe ser adoptada para su evacuación sin peligro para la estabilidad de la obra.

b) Ponderación de los riesgos consecuentes al establecimiento de la obra, en cuanto a la creación o modifi-

cación de las avenidas en su recorrido a lo largo del cauce aguas abajo.

Respecto al primer punto, hay que reconocer que el fenómeno de la máxima crecida es muy complejo y depende de muchas variables, cuya probabilidad de coincidencia caracteriza el riesgo. Debido a esta complejidad, resulta no sólo recomendable, sino absolutamente necesario, el estudio del problema por los distintos métodos conocidos: directos, empíricos, estadísticos e hidrológicos, siendo estos últimos los que tienen un mayor sentido físico, y en los que cabe la posibilidad de estudiar bastante aceptablemente el fenómeno de la máxima crecida.

Los métodos estadísticos, cuyos resultados serían los de mayor garantía, presentan el inconveniente de que, en general, no existen series suficientemente extensas que les proporcionen la adecuada representatividad.

Las normas existentes para el dimensionamiento de aliviaderos utilizan tiempos de recurrencia muy altos (quinientos y mil años) con objeto de tomar un coeficiente de seguridad suficiente, lo que resulta explicable debido a las catástrofes que se han producido por insuficiencia de aliviadero. En algunos países se llegan a calcular máximas crecidas para tiempos de recurrencia de hasta diez mil años, lo que en nuestra opinión no tiene ningún sentido, ni físico ni hidrológico. Los periodos de recurrencia demasiado altos son absolutamente incontrolables en general, por provenir de extrapolaciones excesivas, y aún en el caso de que los valores teóricos sean sobrepasados por valores medios durante el período de explotación, siempre podría justificarse diciendo que dichos valores corresponden a un tiempo de recurrencia todavía más alto.

En nuestra opinión, sin perjuicio de que el valor de la máxima crecida venga fijado para un período de recurrencia amplio (la Instrucción Española de Presas establece quinientos años), éste debería variar de acuerdo con los riesgos previsibles, que dependen fundamentalmente del tipo de presa, situación, etc. Además pensamos que, en todo caso debería exigirse un estudio completo del hidrograma de máximas crecidas para un tiempo de recurrencia que tenga un sentido real y no teórico (entre cincuenta y cien años), en función de los datos que pueden utilizarse en cada caso para obtener los coeficientes de seguridad que suponen la crecida máxima adoptada respecto a estos hidrogramas prácticos e ir ajustando estos coeficientes cada vez más.

Al segundo aspecto señalado presta especial atención la Instrucción Española para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas, y precisamente por la falta de un control suficiente en la determinación de la máxima crecida, trata de evitar que puedan producirse situaciones provocadas artificialmente, más perjudiciales que las que sucederían de no existir la presa. Con este objeto, se impone como preceptivo que la suma de los caudales que puedan ser evacuados por todos los dispositivos sujetos a control no sea superior al caudal de la avenida normal, que se define como aquella cuyo período de recurrencia sea como máximo de cincuenta años, pero calculada siempre con vistas a no alterar, de modo esencial, las condi-

ciones de riesgo preexistentes. La evacuación de la máxima crecida debe realizarse, en consecuencia, mediante una sobreelevación del nivel de embalse sobre el máximo nivel normal, para lo cual la altura de presa asegurará el resguardo correspondiente. Indica, además, que las normas de explotación de los aliviaderos deberán exigir que se maniobren las compuertas de manera que el nivel del embalse no se eleve sobre su máximo normal antes de que las compuertas queden totalmente abiertas.

Metodología de cálculo y experiencia española.—El primer problema que se plantea es el de la definición de crecida de proyecto. La Instrucción mencionada (Madrid, 1967) establece que la capacidad total de desagüe ha de calcularse para el nivel máximo de embalse controlado ($T = 50$ años), pero indica simultáneamente que la altura de la presa ha de asegurar un resguardo que permita la laminación de la crecida máxima ($T = 500$ años). Como por otra parte es preceptivo el estudio de desagüe de la crecida $T = 100$ años, para el aliviadero con una compuerta cerrada, parece evidente que, según se trate del proyecto del aliviadero o de la presa, se precisará conocer:

- a) Para establecer la capacidad de desagüe controlado; caudal máximo para $T = 500$ años.
- b) Para la presa; hidrograma de las crecidas de $T = 100$ años y $T = 500$ años.

Considerando el tamaño de las muestras de precipitación y caudal disponibles, parece aventurado y peligroso pretender extrapolar estos datos con una cierta garantía hasta obtener el hidrograma correspondiente a la crecida $T = 500$ años. No así para la crecida $T = 100$ años, por lo que esta crecida debería ser siempre la preceptiva. Para el estudio de estabilidad y funcionamiento de la presa y sus órganos de desagüe se aplicaría un coeficiente de mayoración del hidrograma $T = 100$ años, función de las características propias de la obra y los daños potenciales aguas abajo y que, en una primera aproximación puede obtenerse de la relación de caudales máximos para tiempos de recurrencia superiores (quinientos, mil años) comparados con el del hidrograma de cien años.

Independientemente de los preceptos establecidos como base de cálculo, es indudable que el proyectista puede estar obligado o interesado en aumentar los periodos de recurrencia anteriormente citados por razones de seguridad, factores humanos, sociopolíticos y económicos. El criterio económico induce a investigar el valor mínimo del coste global actualizado, constituido por los años provocados en caso de destrucción de la obra y el costo de las obras de desagüe.

Este mismo criterio podrá ser utilizado, por ejemplo, para definir la crecida de proyecto de las obras de desvío durante la etapa de construcción de la presa.

En general, una vez definida la crecida de proyecto por su caudal máximo, únicamente los métodos hidrológicos basados simultáneamente en datos de lluvia, pueden proporcionar al proyectista la forma de hidrograma de la crecida de proyecto.

Si la crecida de proyecto sólo debe ser descrita por su caudal punta, los métodos estadísticos (basados en el tratamiento estadístico de datos hidrológicos), empíricos (utilizando fórmulas empíricas que incluyen una gran variedad de características geométricas y geográficas de la cuenca) y de correlación hidrológica (comparando con valores o registros conocidos en otras cuencas), proporcionan una amplia gama de posibilidades al proyectista, quien se encuentra frecuentemente inducido a elegir un valor intermedio entre los diferentes resultados que obtiene.

Estos procedimientos resultan válidos para cuencas del orden de hasta 3.000 Km². En cuencas mayores deberá procederse a su descomposición en cuencas parciales, analizando las posibilidades de concurrencia más desfavorables.

En el caso de crecidas con gran porcentaje de materiales de arrastre o en suspensión, deberán justificarse las hipótesis y cálculos realizados, que den lugar a un incremento en el nivel de las aguas correspondientes a un determinado caudal, así como estudiar específicamente entre los caudales sólidos.

La síntesis de los métodos normalmente utilizados es la siguiente:

Métodos directos.—Su aplicación no debe omitirse nunca, pues aunque no tienen una metodología completa, dan en muchas ocasiones una información muy útil. Consisten en fijar, en un tramo del río suficientemente característico y definido, las cotas máximas alcanzadas por las aguas calculando, a partir de ellas, los caudales que han circulado. Estos métodos reciben a veces el nombre de métodos hidráulicos por utilizar parámetros y fórmulas de hidrodinámica.

Métodos empíricos.—En la actualidad, las fórmulas empíricas no son de una utilidad tan grande y directa como hace años, debido a la existencia de otros procedimientos de estimación de crecidas, que se apoyan en una mayor información hidrometeorológica disponible. Sin embargo, su aplicación en estudios previos no debe despreciarse. Pueden servir también como contraste de valores obtenidos por otros métodos, siempre y cuando se investigue su aplicabilidad al problema y características de la región en estudio. Los inconvenientes principales que presenta su correcta aplicación derivan del hecho de su transposición a cuencas distintas de aquellas para las cuales se dedujeron, por lo que sus coeficientes deben ser variados en función de características propias (climáticas, hidrológicas, geológicas, etc.) de muy difícil ponderación y comparación con las de la región de origen. Además, en un gran número de ellas, no se relaciona el caudal de punta con su período de retorno o probabilidad de ocurrencia, por lo que no se tiene un criterio o juicio respecto a su correspondencia con la magnitud e importancia de la obra a proyectar.

Las fórmulas empíricas de difusión más generalizada pueden clasificarse en dos grandes grupos:

Fórmulas en las que interviene el concepto de probabilidad.

Son las más completas. Tanto la de Fuller como la de Creager se ajustan bien a la mayoría de los ríos españoles. La fórmula generalizada para toda España atiende a la expresión $Q = (4 + 16 \log T) S$.

Q = Caudal máximo.

T = Tiempo de recurrencia.

S = Superficie.

Fórmulas en las que no interviene el concepto de probabilidad.

— Función monomía de la superficie de cuenca: $Q = a S^n$ (Myer, Creager, Valentini, Zapata, González Quijano, etc.).

— Función sencilla de la superficie de la cuenca:

$$Q = \left(\frac{a}{b + S^n} + c \right) S \text{ (tipo italiano, no válidas, en general, para } S > 1.000 \text{ Km}^2\text{).}$$

— Función completa de la superficie de cuenca (Hoffman, Creager, Heras).

— Función de la pluviometría y de la superficie de cuenca (Possenti, Puraza, Heras, etc.).

— Otras (Gete-Alonso, Gutman, Hanna y Kennedy).

Métodos estadísticos.—Estos métodos consisten en estimar la crecida máxima que puede llegar a tener un río a partir de una serie de caudales máximos conocidos, extrapolando en dicha serie mediante una curva de frecuencia con diferentes probabilidades.

Tienen el claro inconveniente estos métodos de que, en general, los datos de partida son caudales medios diarios, de los cuales resulta muy arriesgado el cálculo del caudal máximo instantáneo.

A pesar de sus limitaciones, este sistema ha sido utilizado y verificado con bastante éxito y los resultados son bastante aceptables cuando la máxima crecida es producida únicamente por precipitaciones sin influencia de deshielo, lo cual es lógico, ya que la distribución de precipitaciones se ajusta mejor al cálculo probabilístico que los fenómenos de deshielo.

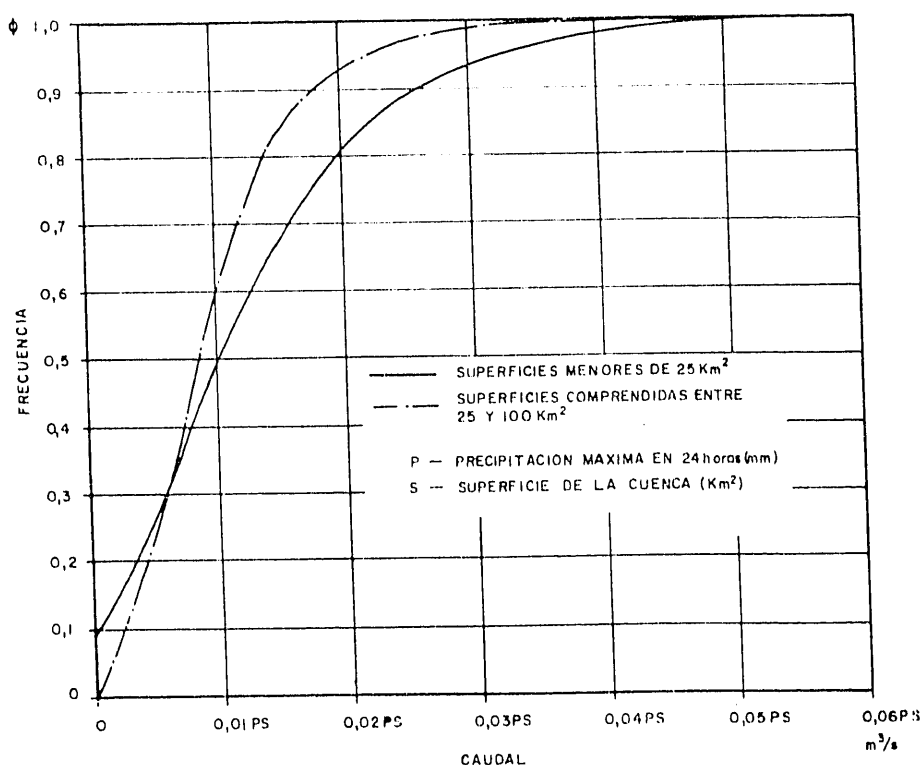
Existen varias leyes de distribución de frecuencias que se aplican en problemas hidrológicos. Estas leyes vienen en función de las características estadísticas de la muestra hidrológica (media, desviación típica, etc.). Como comentario final diremos que cualquier ley de distribución debe tomarse con las reservas propias de la metodología empleada, puesto que el ajuste de las curvas de distribución, aunque aceptable en muchos casos, no es excesivamente bueno, sobre todo por la gran dispersión que suelen tener los valores extremos en cualquier tipo de datos hidrológicos y, por otra parte, se trata de extrapolar resultados a períodos de recurrencia mucho más largos que las series básicas. De todas formas, y en aquellos casos en que se tengan series básicas de suficiente garantía y extensión, los métodos estadísticos dan unos resultados muy aceptables.

Métodos hidrológicos.—La PMP ha sido definida como la altura máxima de lámina de agua que meteorológicamente puede acumularse en un tiempo dado, sobre una cuenca dada y en una época determinada del año, sin tener para nada en cuenta las tendencias climáticas que se producen a largo plazo. Los procedimientos para su estimación no están normalizados, ya que varían con la cantidad y calidad de los datos disponibles, con el tamaño de la cuenca y su emplazamiento, con la topografía de la cuenca y de la región, con los tipos de temporales que producen precipitaciones extremas y con el clima.

La mayoría de los procedimientos existentes están fundados en planteamientos meteorológicos o tradicionales, pero requieren un volumen de información, que los hace difícilmente aplicables en la generalidad de los casos.

fijan los coeficientes de seguridad a utilizar, manteniendo como hipótesis de base que, en un porcentaje elevado de casos, es tan peligroso o más que el infradimensionamiento de los sistemas de desagüe de una presa, el supradimensionamiento que puede aportar por diferentes causas, incluso de explotación, máximas crecidas artificiales, de órdenes de magnitud muy superiores a las máximas aportadas de forma natural.

Las crecidas torrenciales en España.—En España, debido a la gran irregularidad de sus ríos, como consecuencia de sus condiciones topográficas y climatológicas, se da el contraste de que, con estiajes pronunciadísimos, se alcanzan caudales de máximas crecidas del mismo orden, e incluso superiores a los mayores registrados en Europa, siendo posiblemente la crecida del río Duero del



Ley de Gumbel de caudales máximos (superficies de cuenca inferiores a 100 Km²).

No se describe el método de isocronas ni el del hidrograma unitario por ser suficientemente conocidos en cualquier bibliografía; únicamente puede decirse, en cuanto concierne a la experiencia española relativa al cálculo de máximas crecidas, que debe darse una especial importancia al estudio básico de las máximas crecidas para un tipo de recurrencias que estarán condicionadas, fundamentalmente, por las extensiones de las series utilizables, siendo preferible, en caso necesario, estudiar la hidrología completa de máximas crecidas para un tiempo de recurrencia que tenga un sentido físico e hidrológico aceptable a partir del cual y en cada caso y por las características, tanto de la presa como de su entorno, se

año 1909 una de las mayores conocidas en la Europa occidental, para cuencas superiores a 10.000 Km², y alcanzando en los valores extremos de la cuenca mediterránea y de las islas Canarias máximos para cuencas de pequeña superficie, del mismo orden que los valores más altos conocidos en el mundo. Debido a la complejidad del fenómeno de las máximas crecidas y, en especial, de crecidas repentinas, torrenciales y catastróficas que, fundamentalmente, se producen en cuencas de pequeña superficie, resulta difícil ajustar por métodos estadístico-hidrológicos las leyes de distribución de precipitaciones máximas y de caudales de crecida, ya que este fenómeno, en sus casos extremos, se produce de forma

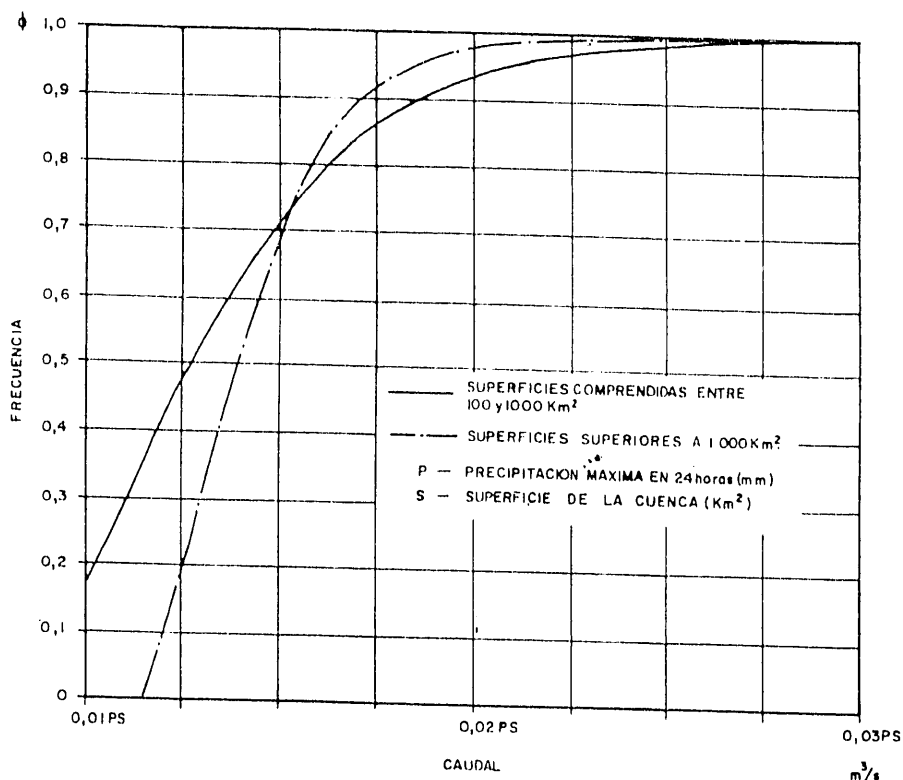
muy irregular y en amplias zonas, tanto de la España peninsular como insular.

En términos generales, puede considerarse que las cordilleras que cruzan la Península Ibérica dividen a ésta en tres regiones climáticas totalmente distintas: vertiente atlántica, vertiente cantábrica y vertiente mediterránea.

Las mayores intensidades de lluvia en la España peninsular se producen en la costa mediterránea, habiéndose medido intensidades máximas de precipitaciones en veinticuatro horas del orden de 350 mm en Valencia, Murcia y Málaga, correspondiendo el valor más

muy amplia sobre estos fenómenos que, en algunos casos —cuenca del Segura—, están recopilados desde el año 1500.

Se ha estudiado toda la información histórica existente, con datos directos de alturas alcanzadas por las aguas y también se han estudiado todas las crecidas producidas en toda la cuenca mediterránea a partir del año 1940, llegándose a valores máximo-maximoum de caudal específico, en $m^3/s/Km^2$, superiores a 20 en cuencas de hasta 25 Km^2 , del orden de 10 en cuencas de hasta 100 Km^2 , e inferiores en cuencas de superficies mayores.



Ley de Gumbel de caudales máximos (superficies de cuenca superiores a 100 Km^2).

alto medido para veinticuatro horas al cabo de San Antonio, con 450 mm. Valores también superiores a los 400 mm en veinticuatro horas han sido medidos en las islas Canarias. Para este tipo de crecidas, tanto en la costa mediterránea como en las islas Canarias, son normales valores superiores a 250 mm en doce horas, y los valores extremos que se conocen son de 200 mm en dos horas y 150 en una hora.

De los estudios estadísticos realizados se deduce que, en valor medio, la precipitación en doce horas puede ser del orden del 80 por 100 de la de veinticuatro horas, y que en cuencas pequeñas se alcanzan intensidades horarias superiores al 50 por 100 de la precipitación máxima en veinticuatro horas.

Estimación de las máximas crecidas catastróficas en España. Métodos directos. — Tienen la gran ventaja, en España, de que se cuenta con una información histórica

Métodos empíricos. — En la formación de la máxima crecida intervienen múltiples variables y la superficie de la cuenca receptora es una de las principales, ya que existe una buena correlación entre el área de la cuenca y el caudal máximo de crecida. De las distintas fórmulas empíricas para estudiar el intervalo de variación de los valores máximos de caudal, se han escogido: Creager, Dickens, Fanning, Forti, Ganguillet, Gutmann, Hoffman, Kuickling, Myer, Quijano, Ryves, Scimeni, Valentini, Zapata y Heras, siendo esta última:

$$Q = p \cdot i \cdot e;$$

donde:

Q = caudal máximo (m^3/s).

p = coeficiente característico de la cuenca.

i = intensidad horaria de precipitación (mm).

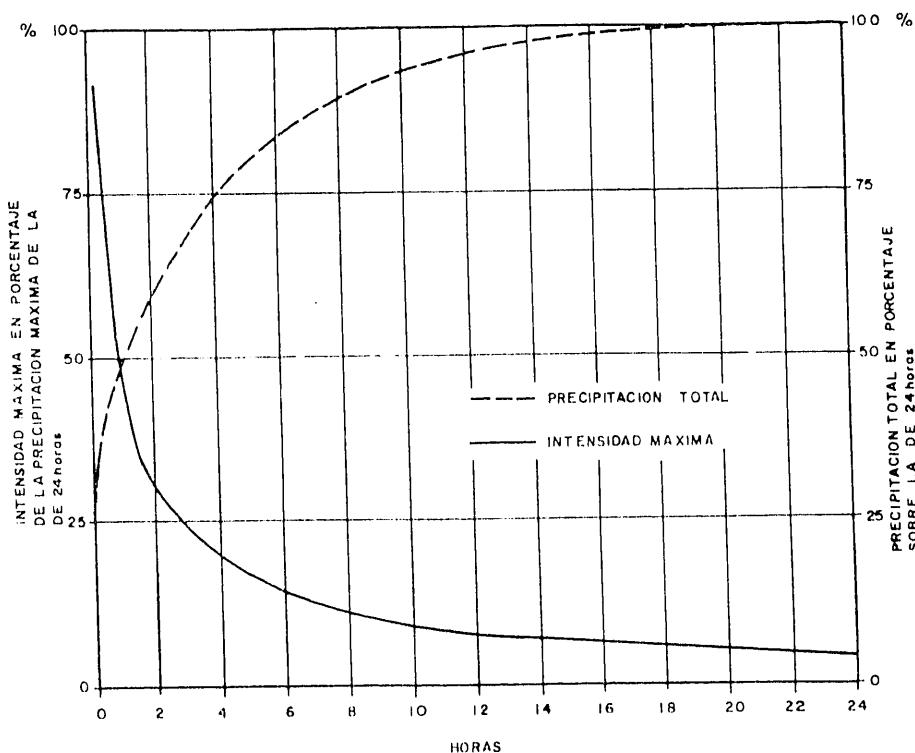
e = coeficiente de escorrentía.

Esta fórmula ha sido ajustada a las series de precipitación y escorrentía de la zona, para tiempos de recurrencia de 50, 100 y 500 años

Métodos estadísticos. — Siendo las precipitaciones máximas en veinticuatro horas los datos más completos utilizados, se han estudiado estadísticamente para obtener los valores correspondientes a distintos periodos de recurrencia. De las diferentes leyes de distribución utilizadas Goodrich, Gibrat, Gauss, Pearson y Gumbel, se ha obtenido el mejor ajuste con la de Gumbel.

Del ajuste de Gumbel se han obtenido los valores necesarios para dibujar los mapas de líneas isomáximas de precipitaciones en veinticuatro horas, para un periodo de recurrencia de quinientos años. Este método se

cronas. La velocidad media de propagación se fija por métodos experimentales y empíricos, en función de los datos físicos y demás características propias de las cuencas (vegetación, geología, etc.). En nuestras cuencas la velocidad máxima se ha fijado en 8 Km/hora, aunque en valor medio varía entre 5 y 7 Km/hora. Una vez fijada la velocidad, se obtiene el tiempo que tarda en llegar el agua al emplazamiento estudiado desde una serie de puntos con los que, a semejanza de un levantamiento topográfico, se dibujan las curvas isocronas. Multiplicando el área comprendida entre cada curva por la intensidad de precipitación y el coeficiente de escorrentía supuestos, se obtiene el caudal en el punto estudiado, debido a la precipitación en cada una de las zonas.



Curvas de distribución porcentual de precipitación máxima en veinticuatro horas.

ha aplicado igualmente a los valores de caudales de todas las estaciones de la cuenca mediterránea, y correlacionando los caudales obtenidos con la precipitación máxima, se han ajustado las leyes de distribución de Gumbel, que dan el caudal máximo en función de la precipitación máxima en veinticuatro horas y la superficie de cuenca, habiéndose considerado superficies menores de 25 Km², entre 25 y 100, 100 y 1.000 y superiores a 1.000. Los resultados se indican en los gráficos adjuntos.

Métodos hidrológicos. — En estos métodos se trata de reproducir el fenómeno físico de la máxima crecida, y en este caso utilizaremos el método de las curvas iso-

En función de los estudios realizados, con ajuste de la ley de distribución de Gumbel a valores máximos de precipitación en veinticuatro, doce, seis, dos y una horas, se han ajustado las curvas de distribución porcentual de distribuciones máximas en veinticuatro y doce horas para cada intervalo de tiempo y también la intensidad en milímetros/hora para cada tiempo de duración del temporal, en función del máximo en veinticuatro horas. En lo que se refiere a los coeficientes de escorrentía, y en función de los datos directos utilizables y de las características físicas (en especial el índice de pendiente), geológicas y geomorfológicas de las cuencas, se han obtenido valores del orden de 0,85.

Un factor importante es la duración del temporal; de los estudios realizados para distintas hipótesis de la duración del mismo, se ha llegado a resultados que indican que, en más del 90 por 100 de los casos, la duración más desfavorable corresponde a temporales de duración igual al tiempo de concentración de la cuenca.

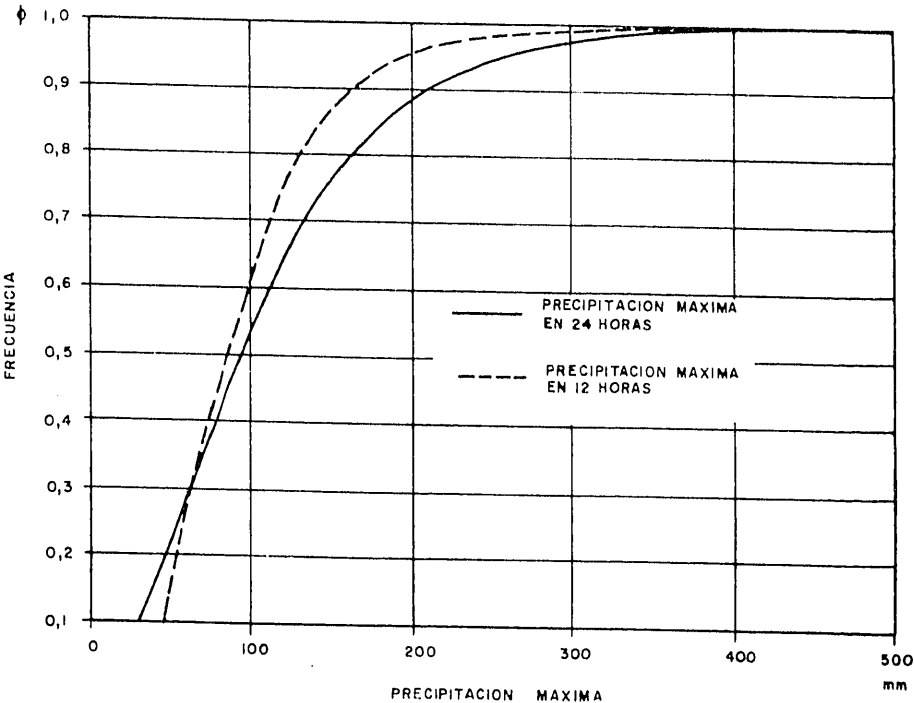
Las intensidades de precipitación, debido a la complejidad y rapidez del fenómeno, son muy irregulares, con valores muy dispersos en puntos muy extremos. Sin embargo, puede considerarse que, en la hipótesis de que el temporal se produzca simultáneamente en toda la cuenca, el gradiente de precipitación dentro de la misma no es muy acentuado, por lo que es posible considerar una intensidad de precipitación uniforme para toda la cuenca.

Conclusiones. — Como consecuencia del estudio de todos los datos históricos existentes y de los resultados obtenidos por los distintos métodos empleados, en los que se han tenido fundamentalmente en cuenta los valores máximos de precipitación y las características físicas y geomorfológicas de las cuencas, llegamos a los valores que indica el cuadro adjunto, de caudales máximos-maximorum específicos en m³/Km², para distintas superficies y tiempos de recurrencia, que deben considerarse únicamente como valores máximos de caudal, ya que, como consecuencia de los arrastres sólidos en estas

cuencas de tipo torrencial, para los mismos valores máximos las aguas pueden alcanzar niveles mucho más altos que, en casos límite, producen el cierre de los cauces naturales o artificiales, provocando unos efectos catastróficos muy superiores a los que produciría la propia máxima crecida. Sin embargo, los órdenes de magnitud de las crecidas normales no alcanzarían más de un 50 por 100 de los valores anteriormente citados.

Caudales específicos máximos-maximorum

Superficie Superficie (Km ²)	Periodo de recurrencia (años)		
	50	100	500
	Caudales punta Caudales punta (m ³ /s/Km ²)		
Menor de 25	10	15	20
Entre 25 y 100	6	8	12
Entre 100 y 1.000	4	5	6
Mayor de 1.000	2	2,5	3



Ley de distribución de precipitaciones máximas.

BIBLIOGRAFIA

- "Monografía de la Comisión de Recursos Hidráulicos del II Plan de Desarrollo". Madrid, 1967.
- MENDILUCE, J. M., y PLIEGO, J. M.: "Anteproyecto General de Aprovechamiento Conjunto de los Recursos Hidráulicos del Centro y Sureste de España. Complejo Tajo-Segura". Dirección General de Obras Hidráulicas. Madrid, 1967.
- Centro de Estudios Hidrográficos: "Anales del Segura". Madrid, 1969.
- Centro de Estudios Hidrográficos: "Inventario de Recursos Hidráulicos". Madrid, 1970.
- HERAS, R.: "Métodos prácticos para estimación de máximas crecidas". Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid, 1970.
- Centro de Estudios Hidrográficos: "El inventario de Recursos Hidráulicos y los balances hidráulicos de carácter nacional". Madrid, 1971.
- Servicio Geológico de Obras Públicas y Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental: "Estudios de Recursos Hidráulicos Totales del Pirineo Oriental". Madrid-Barcelona, 1971.
- Consejo Económico Sindical Interprovincial del Ebro: "Estudios de Recursos Hidráulicos del río Ebro". Zaragoza, 1971.
- HERAS, R.: "Métodos prácticos para el estudio de aguas superficiales y subterráneas". Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid, 1972.
- "Aprovechamiento de los recursos del tramo inferior del río Ebro. Anteproyecto del Acueducto Ebro-Pirineo Oriental". Madrid, 1973.
- MENDILUCE, J. M.: "Las disponibilidades de recursos hidráulicos en España y el papel real de las aguas subterráneas". *Revista Hidrología*, núms. 20-21. Madrid, 1975.
- Centro de Estudios Hidrográficos: "Anuarios de Aforos". Madrid.
- MENDILUCE, J. M., y HERAS, R.: "Criterios y Experiencias de la regulación de los ríos". Madrid-México, 1976.