

LA LLUVIA MEDIA COMO UNICA VARIABLE DETERMINANTE DEL REGIMEN HIDROLOGICO DE LAS CUENCAS DE UNA ZONA

Por J. R. TEMEZ PELAEZ
Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

I. Objeto del trabajo.

Como consecuencia del movimiento no caprichoso de los vientos húmedos y de la posición invariable de los obstáculos que la Orografía opone a ese movimiento, hay regiones en que la meteorología presenta fundamentalmente un carácter de unidad de forma que existe una cierta relación entre los regímenes pluviométricos de sus diversos puntos; y se mantienen constantes dentro de ellas algunos de los factores determinantes de esos regímenes; a tales regiones las llamaremos zonas meteorológicas.

Junto a la meteorología, como elemento más decisivo en la hidrología de la cuenca, cabe destacar, aunque con menor importancia, la influencia de la geología. Se concibe que la zona meteorológica no la compondrán cuencas aisladas y distantes, sino que ha de suponer una unidad posicional en el globo, generalmente un valle o una vertiente, y por ello no es difícil que presente una común macrogeología. De no ser así, lo más probable (esta afirmación se basa en los resultados de las cuatro zonas aquí analizadas) es que no existan a lo largo de ellas variaciones continuas ni oscilaciones importantes de permeabilidad, sino escalones bruscos en número muy reducido (en las zonas antes aludidas, uno o ninguno) coincidiendo con cambios geológicos y que marcan los límites de las subzonas a que el factor geología da lugar. Concretamente en la vasta zona formada por la vertiente Norte de nuestra península, aparecen dos subzonas comprendiendo una, los terrenos ígneos y metamórficos de la región gallega, y otra, el resto, con terrenos sedimentarios más permeables, lo que se acusa en una menor escorrentía y mayor regularidad netamente diferenciada de aquella de la otra subzona.

Por ello se concibió la esperanza, posteriormente confirmada, de que a esa unidad meteorológica fuera unida la hidrológica.

Nuestra tesis es:

- 1.º Que, como consecuencia de lo expuesto al definir la zona, los regímenes meteorológicos en ella son susceptibles de caracterizarse en función de un solo parámetro.
- 2.º Que ese parámetro puede ser uno tan accesible y sencillo como la lluvia media.

3.º Que además, debido a la íntima relación meteorología-hidrología, esa lluvia media es dentro de la zona, o de la subzona si la geología subdividiera aquélla, el único elemento determinante no sólo de la aportación media, sino del régimen hidrológico de las cuencas, y así en función de ella se puede encuadrar en leyes únicas generales los diversos aspectos de ese régimen.

Además de las correlaciones de lluvias y aportaciones, que de una forma u otra se han venido utilizando desde antiguo, aquí se propone por primera vez una correlación análoga entre la lluvia media de una cuenca y la regulación de sus aguas, solicitando para ella en los estudios hidrológicos un puesto parejo al que aquélla ocupa en la actualidad.

El objeto de este trabajo es de demostrar experimentalmente la existencia de tales leyes, su simplicidad y lo extenso de su campo de aplicación, suministrando así un medio racional y preciso de abordar la hidrología de cuencas concretas en las que se carece de datos de aforo. Los registros de otras cuencas de la "zona meteorológica" suministrarán puntos experimentales y la ley surgirá como la interpolatriz de tales puntos; dicha ley dará respuesta adecuada a la cuenca en cuestión, en cuanto se entre en ella con el valor de su lluvia media.

En resumen, esta teoría no defiende sino que una realidad física como es el régimen de un río, es determinable dentro de una zona con el único conocimiento del valor de la lluvia media, siendo el efecto de las otras variables, o bien despreciable, o bien indirectamente reflejado en tal valor; en consecuencia, no presupone ni va condicionado a hipótesis concretas de ecuaciones, ni a unos determinados métodos de cálculo. Sin embargo, para la demostración experimental ha sido preciso decidirse por algunos de ellos y, según se detalla en los apartados correspondientes, se han elegido los de habitual aplicación en nuestra patria.

II. Estado actual del problema.

Al intentar abordar el estudio hidrológico de una cuenca, es muy frecuente que el primer escollo a salvar sea la carencia de datos de aportaciones.

La inexistencia de estación de aforos en el punto deseado, o la corta vida de ésta, incapaz de suministrar registros en número suficiente para que los resultados que de ellos se destilen sean significativos, obliga a la andadura de caminos más largos y menos firmes. La presencia de una estación de aforos en otra cuenca más o menos próxima a la del estudio, suele ser la puerta abierta que da acceso a tales caminos. Admitiendo que ambas cuencas son de "características hidrológicas semejantes", el enlace entre sus resultados se establece mediante la simple proporcionalidad a los valores respectivos de superficies, pluviometría, aportación o potencias de tales valores, según los casos. Para otorgar tal atributo de "cuenca hidrológicamente semejante" no se puede ser muy exigente, so pena de no encontrar ninguna con datos que cumpla tales condiciones, y en general nos basaremos en un análisis macroscópico de geología y situación. Con el natural temor a tan simples extrapolaciones, éstas no se suelen hacer sino entre cuencas muy próximas.

Son frecuentes los casos en que los resultados obtenidos a partir de dos estaciones de aforo próximas a la cuenca del estudio presentaron diferencias de cierta importancia, poniendo en evidencia la imprecisión del método.

Ante la dificultad de encontrar otra cuenca con datos y que se evidencia como

de "características hidrológicas semejantes", ante lo grosero de la aproximación que cabe esperar cuando esta condición no se dé, ante la vaguedad de tal término, donde ni se precisa cuáles son esas características ni cuáles las fundamentales a cada aspecto de estudio, ni si es despreciable el efecto de las demás, surge el deseo de concretar tales puntos y mejorar el método que nos permita utilizar en una cuenca los registros de otras vecinas.

III. Aspectos que abarca el estudio zonal.

Los tres aspectos más importantes en el estudio hidrológico de un embalse son: aportaciones, regulación y máximas avenidas.

Si el fin que se persigue es el aprovechamiento de unas aguas, parece lógico comenzar por conocer su cantidad. La ley de las aportaciones siempre ligada a su variable más directa, la precipitación, ha sido tema de investigación de los más afortunados hidrólogos: sirva de ejemplo la de nuestro profesor D. Enrique Becerril, que para los ríos de la España peninsular propone la correlación $A = K p^{3/2}$ para valores de aportación A y lluvia P en mm. y K .

0,007	para regiones muy secas (tipo La Mancha).
0,010	para regiones pobres (tipo Páramos).
$0,012 < K < 0,014$	para regiones medias (tipo Guadarrama).
$0,013 < K < 0,016$	para regiones abundantes (tipo Cantábrico).
$0,018 < K < 0,020$	para regiones muy abundantes (tipo Pirenaico).

Aquí se distingue entre ley de valores medios de aportación y pluviosidad de las diferentes cuencas y leyes de valores anuales de cada cuenca concreta, a la vez que se señala la relación de éstas con aquélla.

También ha de interesar el conocer las necesidades de embalse para la adecuada utilización de esas aguas. Sin embargo, este aspecto más complejo, cual es el de la regulación, no ha dejado evidenciar la variable que directa o indirecta, pero fundamentalmente, lo determina, y no se conoce ninguna publicación que, siquiera a *grosso modo*, intente cuantizar esa función. Ese tema se trata aquí con especial atención y se cree la parte más interesante y original del trabajo.

Las grandes avenidas influyen de importancia en las obras a través del coste de los dispositivos para su evacuación. Es el punto éste de los grandes caudales, otro de los predilectos de los hidrólogos en sus esfuerzos de generalización. Se recuerdan aquí las leyes envolventes propuestas para las máximas avenidas, generalmente del tipo $Q = K S^\alpha$, donde S es la superficie de la cuenca, α un exponente inferior a la unidad, en general variable desde $1/2$ para cuencas grandes hasta 1 para cuencas muy pequeñas, y K una constante dentro de amplias regiones. El tema de las avenidas queda, por el momento, al margen de este trabajo.

IV. Correlación aportación media-pluviosidad media en las cuencas de la zona.

Es a todas luces evidente la relación entre la precipitación sobre una cuenca y el agua que recoge el río que la drena; y de siempre se vio así, si bien el matizar y concretar tal relación es relativamente reciente. Desde las discusiones filosó-

ficas sobre el ciclo hidrológico, donde Platón y Aristóteles suponían que la lluvia era menor que la escorrentía y la existencia de fuentes marinas subterráneas, hasta la aparición de las recientes leyes lineales o parabólicas de correlación, fue preciso el paso de muchos siglos.

A pesar de tan clara relación, se comprende la influencia que en la aportación tiene que tener el que una determinada lluvia anual P se haya conseguido como suma de pequeñas intensidades a lo largo del año, o bien de fuertes aguaceros en pocas fechas. Del mismo modo que la distribución temporal, influye en la aportación la distribución espacial de las precipitaciones dentro de la cuenca. Eso justifica, por un lado, la gran dispersión de los valores individuales de la correlación $A-P$ de cualquier cuenca, y por otro, el que dos cuencas de iguales características incluido el valor de lluvia, pero situadas en zonas diferentes, no coincidan en su aportación. Pero dentro de una zona, debido a la comunidad de situaciones meteorológicas, tales factores de variabilidad estarán relacionados en las diferentes cuencas.

En lo referente a la correlación de aportación y pluviosidad en valores medios, y precisamente por el carácter de tales datos, era de esperar que las dispersiones fueran muy pequeñas, y la experiencia así lo confirmó (láminas 1, 2, 3 y 4). El ajuste se hizo para correlación lineal. Un comentario sucinto sobre cada una de las láminas se hace en el apartado VII, donde se define también la extensión de las cuatro zonas estudiadas, zonas que no se han elegido caprichosa o intencionadamente, sino que se han aprovechado aquellas que, con motivo de proyectos concretos de embalse, ha tenido que estudiar el autor.

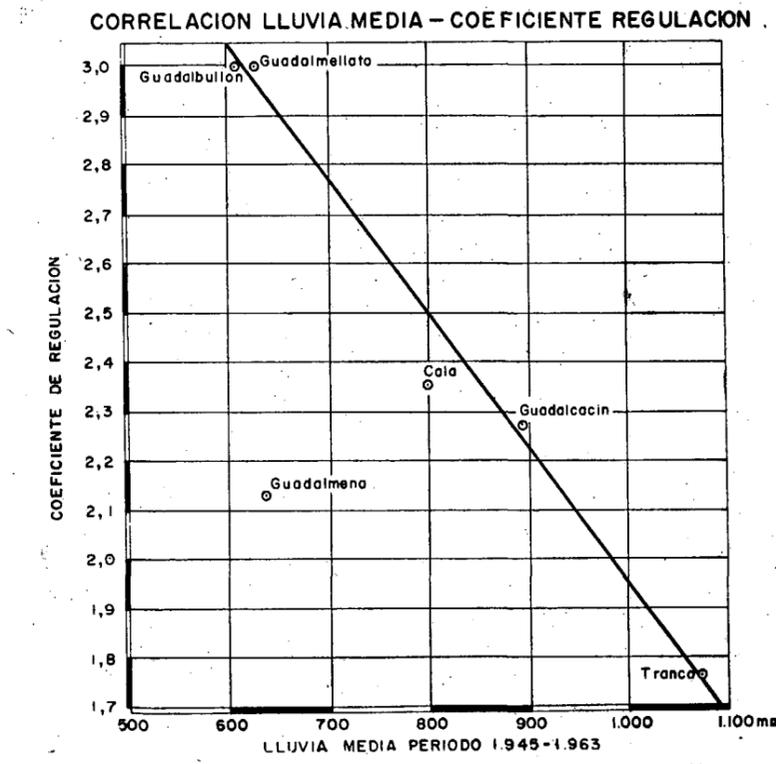
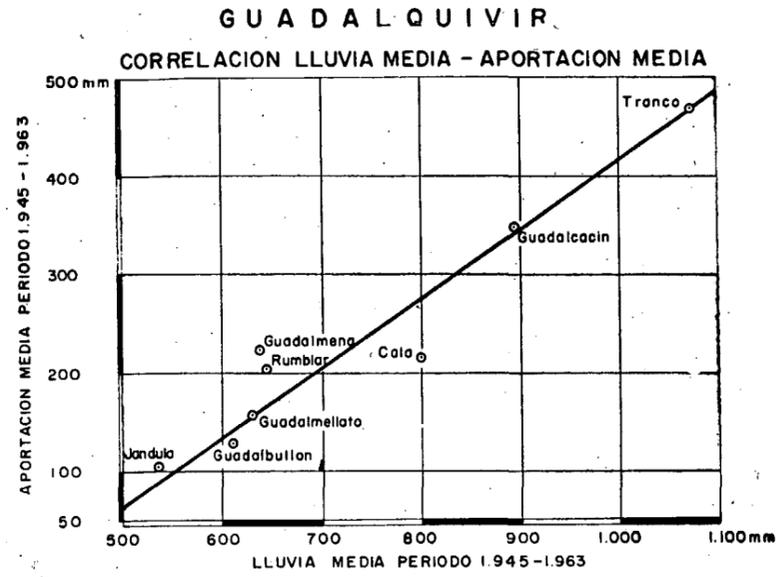
El período de registro de las diversas cuencas, cuyos valores medios servirán para la interpolación, deberá de ser lo suficientemente largo para que dichos valores medios sean representativos, y el mismo en todas las cuencas, si bien pueden no coincidir el de registro de las aportaciones con el de lluvias, en cuyo caso la ley no define correlación $A-P$, sino una ley bastarda, pero de la misma utilidad. Tal desfase entre el período 1, de registro de la aportación, y el 2, de la lluvia es posible admitirlo porque si son suficientemente amplios, dentro de la zona se cumplirá sensiblemente

$$\frac{P_1}{P_2} = \text{cte.}$$

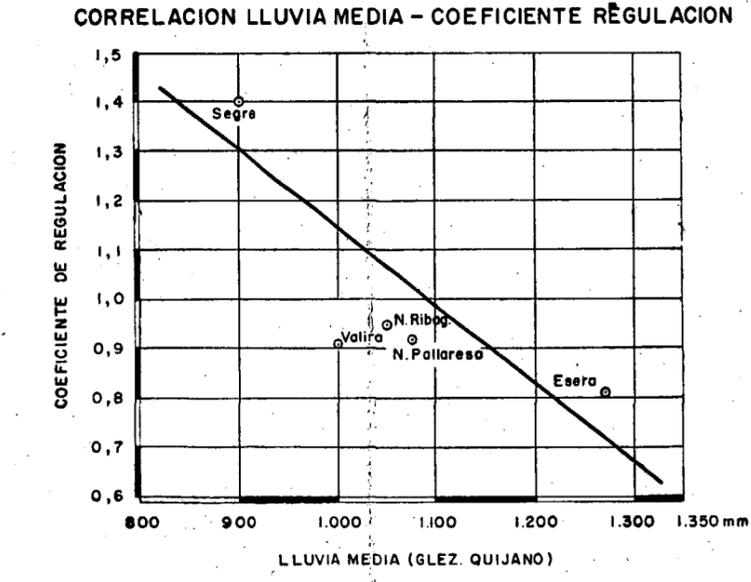
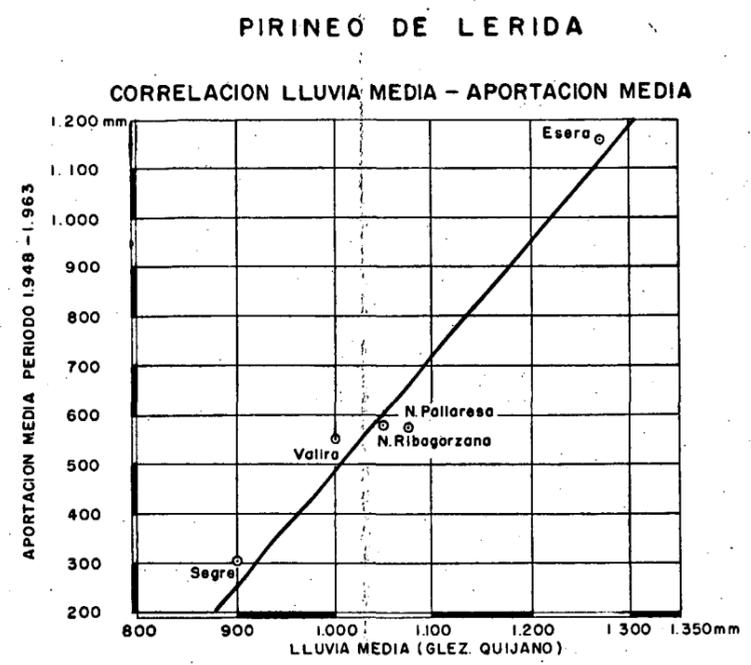
V. Correlación lluvia-aportación particulares de cada cuenca.

Para una cuenca concreta los puntos correspondientes a las parejas $A-P$ de cada año, ya se ha dicho presentan una gran dispersión, pero la ley interpolatriz de ellos refleja características medias y los coeficientes que definen esas leyes particulares son susceptibles de encuadrarse a su vez en una ley general, válida para la zona y con pequeña dispersión. La variable de la cual dependen tales coeficientes es, asimismo, la lluvia media; es decir, si en una cuenca la pluviosidad media es P_m y se admite como correlación de los valores anuales de lluvia y aportación $A = K P^{3/2}$, o bien $A = K_1 P - K_2$, se tiene $K = K(P_m)$, o bien $K_1 = K_1(P_m)$ y $K_2 = K_2(P_m)$ (lámina 5).

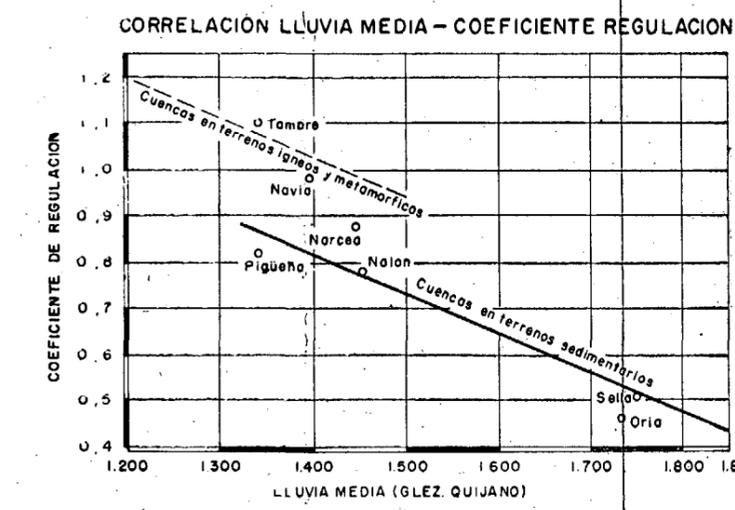
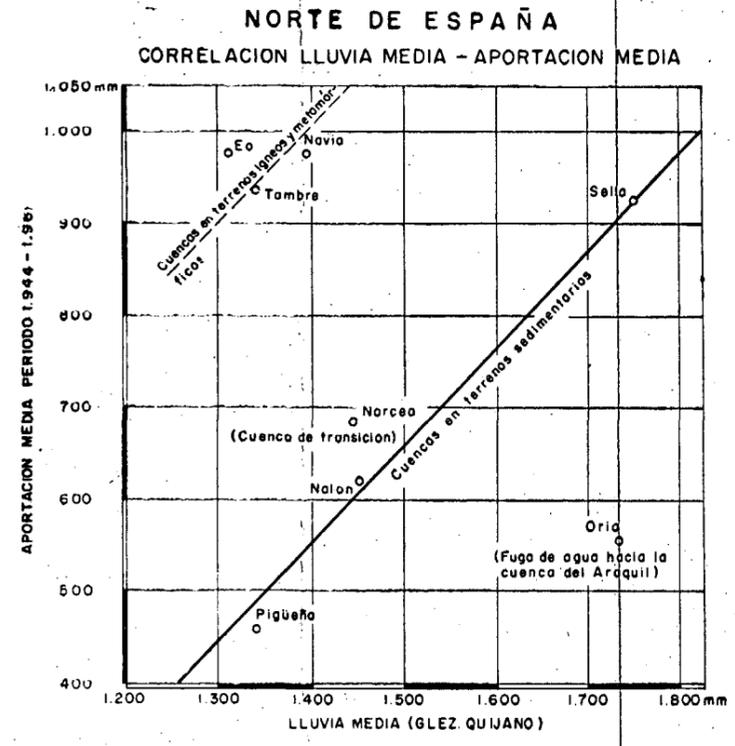
Esta clase de estudios sólo se realizó para la "zona meteorológica" del Guadalquivir, y así la confirmación experimental es menos segura que la de los otros aspectos aquí mencionados; sin embargo, los resultados que de él se deducen y



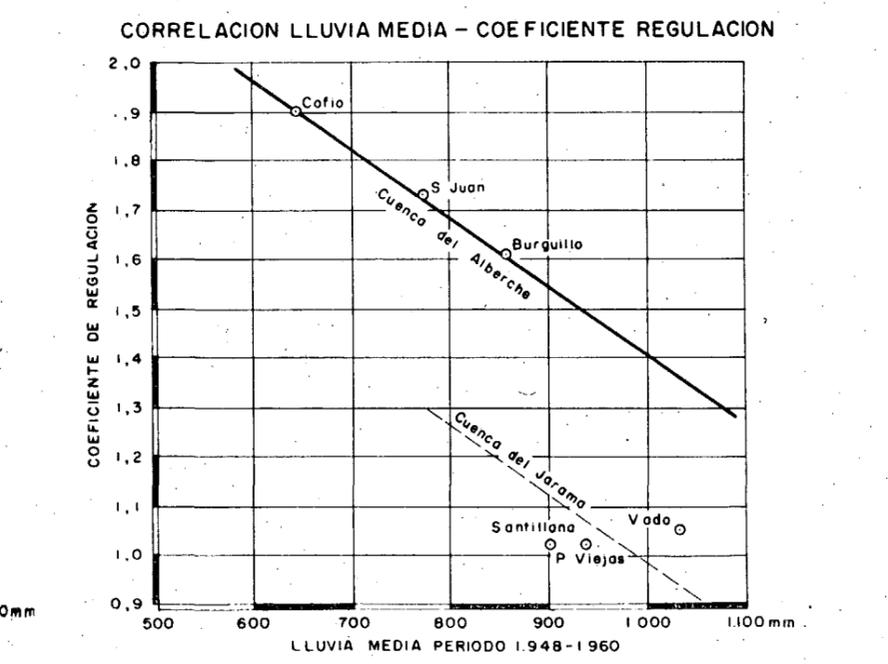
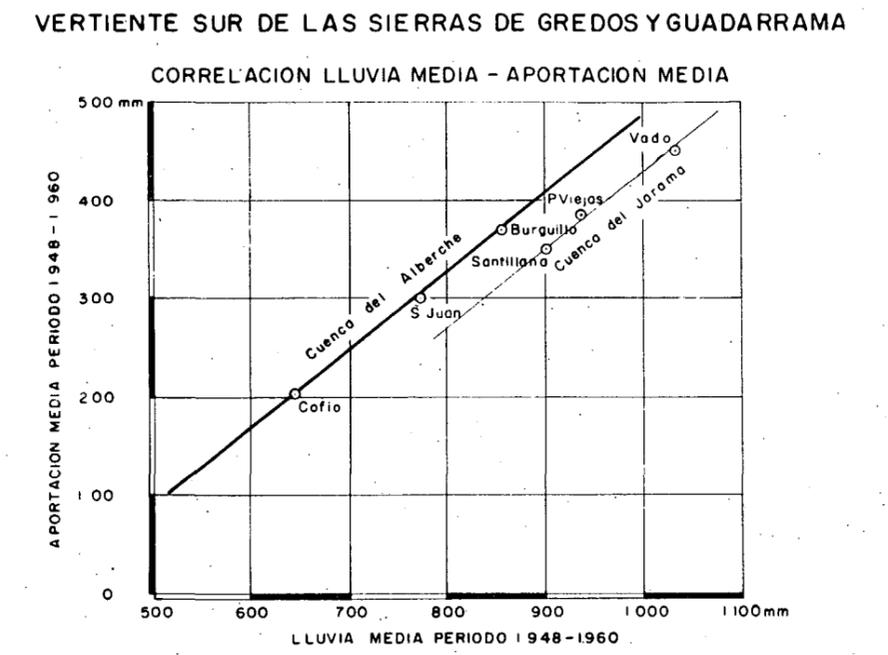
LAMINA 1



LAMINA 2



LAMINA 3

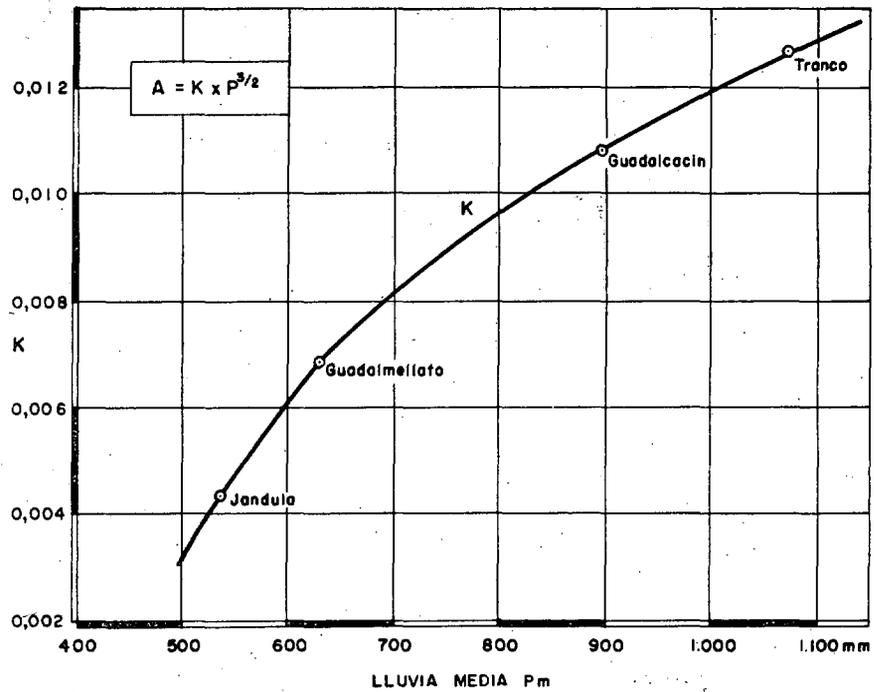
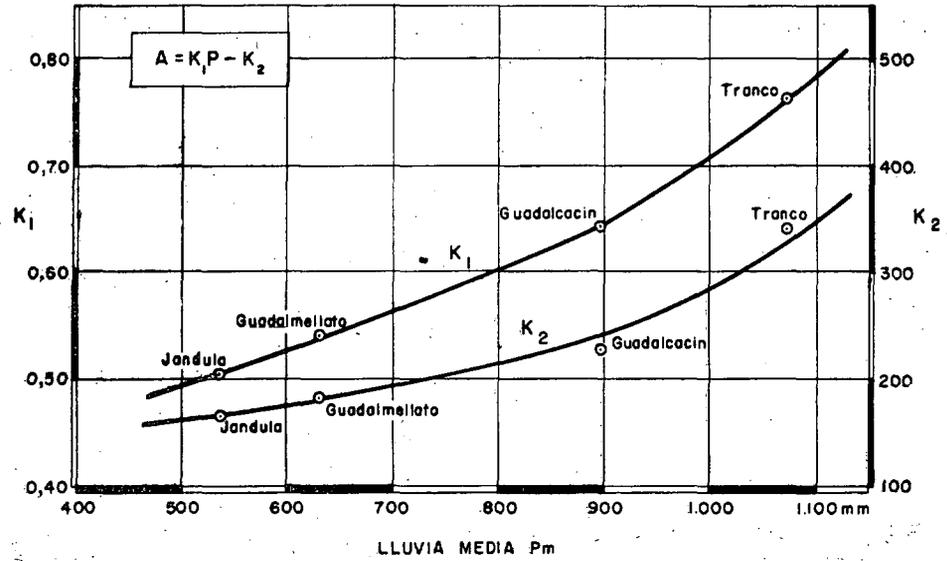


LAMINA 4

la lógica de las conclusiones que de ellos se desprenden, animan a incluirlos en este trabajo:

— Los coeficientes son crecientes con el valor de la lluvia media. Recuérdese que el profesor Becerril señalaba un crecimiento análogo del coeficiente con la abundancia de las regiones.

CORRELACION DE VALORES DE LLUVIA P Y DE APORTACION A EN UNA CUENCA DE LLUVIA MEDIA Pm.

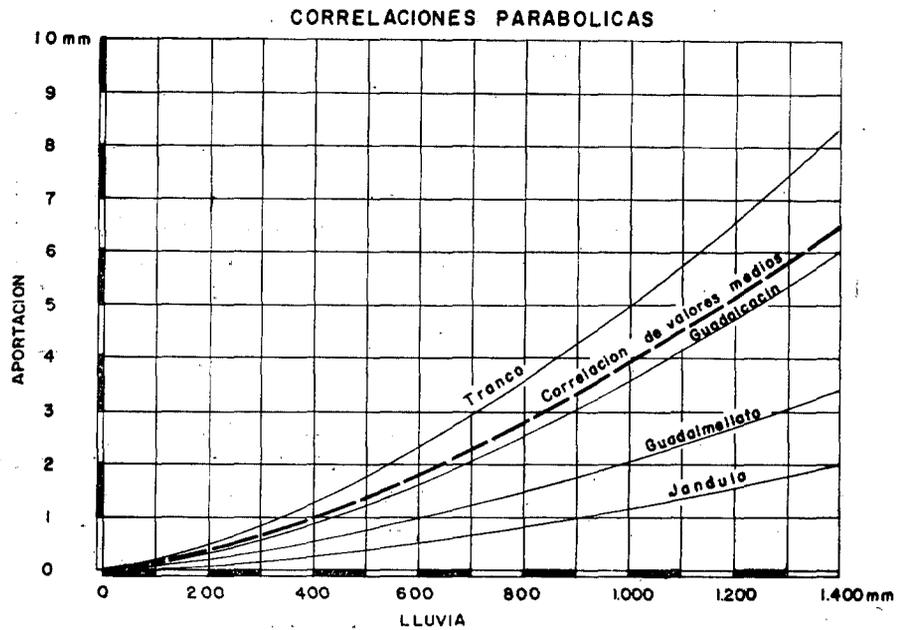
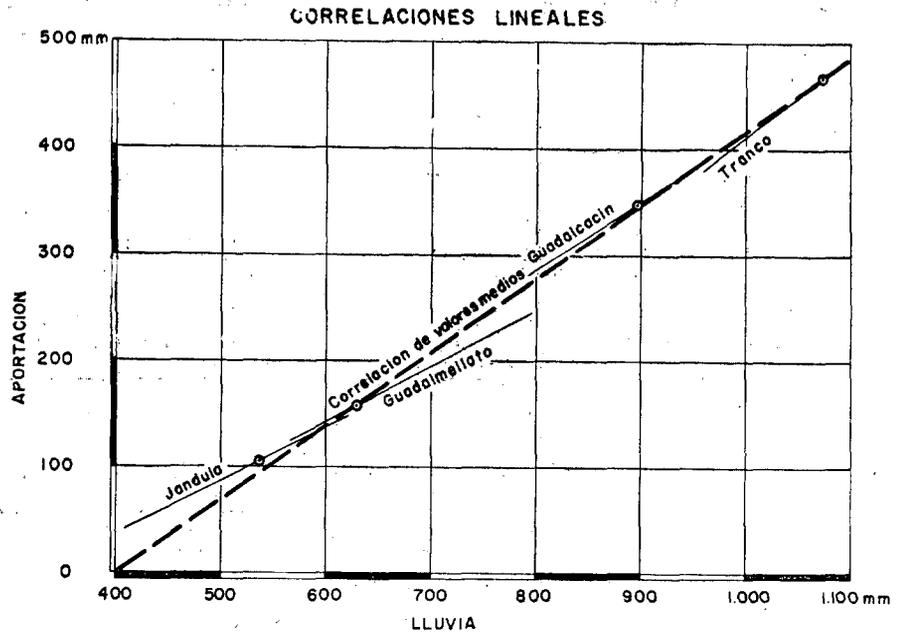


LAMINA 5

— Para las cuencas más abundantes, dichos coeficientes se confunden e incluso llegan a superar ligeramente a los de la correlación $A_m = P_m$ de la zona, conservándose inferiores los del resto de las cuencas:

Los cálculos se hicieron para correlación lineal $A = K_1 P - K_2$, interpolando por mínimos cuadrados y para el tipo parabólico $A = K p^{3/2}$, con un solo parámetro in-

CORRELACIONES ENTRE LOS VALORES ANUALES DE LLUVIA Y APORTACION



LAMINA 6

determinado, obligando a la curva a pasar por $\left(\frac{\sum_{i=1}^N \log P_i}{N}, \frac{\sum_{i=1}^N \log A_i}{N} \right)$, como ocurriría en una interpolación por mínimos cuadrados.

El aspecto de las curvas de correlación es el de la lámina 6.

VI. Correlación lluvia-media. Regulación.

Ya hemos llamado la atención sobre la novedad que supone el correlacionar la regulación con otra variable hidrológica y el interés que tiene, máxime cuando tal variable no es sino la lluvia media de la cuenca, tan extensamente conocida.

Sin entrar en la lógica de la relación regularidad-pluviosidad, se observa que las zonas más secas son más irregulares (en España es de todos conocido el aumento simultáneo de pluviosidad y regularidad desde el Sur hacia el Norte) y que dentro de una misma zona son las cuencas lluviosas las más regulares. Esas observaciones fueron las que nos llevaron a intentar esta correlación y marcaron el primer paso de los trabajos que dieron lugar a este artículo.

En lugar de desglosarlo en correlaciones parciales entre la lluvia media y cada uno de los parámetros característicos de la regularidad de las aportaciones, se ha preferido aquí, guiados por el fin práctico de estos estudios, cual es la obtención de la curva de regulación, el encuadrar todas ellas en una sola correlación que cumpla esa finalidad.

En un estudio de regulación lo que se persigue es encontrar la curva que relaciona los volúmenes anuales regulados con el embalse necesario para tal regulación. La curva estará representada en valores específicos cuando los embalses, volúmenes regulados, se consideren referidos al valor de la aportación media.

El valor del embalse que señala la curva de regulación en valores específicos para volumen regulado 1 y garantía $G(1)$, es lo que se define como coeficiente de regulación, es decir, para regular la aportación media A_m como garantía G se necesita un embalse $r A_m$, y ese valor r será el elegido aquí como representativo de la regulación en la correlación.

La correlación P_m-r no aparece tan evidente como la P_m-A_m , y han de ser los resultados experimentales de las cuencas con estaciones de aforo las que la avalen, en caso de que, efectivamente, los puntos P_m-r_m correspondientes a ellas sean susceptibles de una interpolación de escasa dispersión. Los trabajos llevados a cabo sobre las cuatro "zonas meteorológicas" estudiadas, y que se definen en el apartado siguiente, así lo confirman y son la mejor prueba que podemos aportar de la existencia de tal correlación. En las láminas 1, 2, 3 y 4, se representan las leyes obtenidas en las mencionadas zonas, y en el apartado VII se hace un breve comentario sobre cada una.

En ellas se puede observar el buen acuerdo de las curvas con los puntos experimentales, y que los puntos discrepantes en la correlación P_m-r lo son también en la P_m-A_m , por lo que las discrepancias no sólo no desdichan de tal correlación, sino que la confirman al repetirse en otra tan evidente y sancionada por la prácti-

(1) La garantía G que se debe exigir a una regulación no se puede fijar con carácter general, y en este apartado se hablará más adelante del tema. La validez del estudio no está condicionada a G y se pueden realizar los cálculos para cualquier garantía de forma análoga como se hace aquí para $G=0,8$. Se eligió 0,8 por considerarlo prudente dentro del campo de valores prácticos.

ca como la $A_m - P_m$. Esas anomalías pueden deberse a errores en los datos o bien a características singulares de la cuenca que la apartan de la ley general.

Para que los estudios de regulación sean significativos, se requiere trabajar con períodos de registro aún superiores a los exigidos en el cálculo de las aportaciones medias; por ello el número de estaciones de aforo y, en consecuencia, el de puntos experimentales con que se cuenta para esta clase de estudios, es inferior.

En cada una de las estaciones de aforo se aplicó el método estadístico propuesto por el profesor Becerril, del cual hacemos un resumen a continuación, remitiendo para más detalle al libro *Regulación de los ríos*, editado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas:

"El volumen de embalse se descompone en dos sumandos: el correspondiente a la regulación anual y el de regulación hiperanual.

El primero se determina mediante la curva envolvente de los puntos experimentales, que corresponden a los años de aforo, dibujados en un gráfico cuyas abscisas representan la aportación anual, y las ordenadas, el embalse necesario. Para obtener el embalse capaz de regular la aportación de cada uno de los años, se empleó el procedimiento habitual de las curvas de caudales acumulados y se supuso un desembalse constante a lo largo del año."

El volumen de regulación hiperanual se determina, a su vez, en función del volumen a regular, de la garantía que se requiere para ese servicio y de la curva de frecuencia de los valores de las aportaciones anuales, que previamente es necesario ajustar a la vista de los datos de aforo. Conocidos los valores de esas variables, en el libro *Regulación de los ríos*, aparecen las curvas con los valores correspondientes del embalse.

La curva de frecuencia se supone del tipo:

$$\varphi = \frac{1}{\lambda} m \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^m}$$

donde λ viene definido por una función de Euler:

$$\lambda = \frac{1}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)}$$

Queda como única incógnita m , que es el valor que se debe deducir para lograr el mejor ajuste con los puntos de los datos de aforo.

Descomponemos la aportación anual en dos: una constante A_c y otra variable A_v . En un río, se tiene la convicción, basada en la experiencia, de que la aportación anual no bajará nunca de un determinado valor A_c en la mayoría de los casos distintos de cero. De todos modos, no tomaremos ese valor como el menor observado, sino aquél, deducido por tanteos, que consigue un mejor ajuste de la curva. Eso sí, los tanteos irán orientados por los valores observados.

Si la media de las aportaciones variables A_v es $A_v m$, la x a la que se refiere la función de probabilidad es: $x = \frac{A_v}{A_v m}$.

El fijar el valor de la garantía que se debe exigir a la regulación, es un problema delicado y en el que concurren factores de tipo económico ajenos a la hidrología. Transcribiremos a continuación, tomado del libro *Regulación de los ríos*, lo que el autor dice hablando de este tema:

"Ciertamente, la elección técnica habrá de guiarse — hasta donde ello sea posible — por normas más objetivas que, a su vez, tendrán en cuenta la experiencia de otras explotaciones y el análisis del daño que se originaría por la falta del caudal previsto. Es decir, que, como en tantas ocasiones, la teoría y la práctica se influyen en el ejercicio de la técnica, y si aquélla determina orientaciones generales, ésta mide y valora su eficacia y devuelve delimitados y concretos los aspectos genéricos que aquélla señalara."

Para los cálculos y curvas de este estudio, se adoptó garantía 0,8, valor que se cree prudente tanto por el rápido crecimiento del costo con el aumento de esas garantías ya altas (para regular la aportación media con garantía 1 haría falta un embalse infinito), como por considerar que esas garantías aumentan si se admiten pequeñas diferencias en el servicio, que seguramente el consumo puede absorber sin grave trastorno.

De todos modos, se puede tener una idea suficientemente aproximada de la regulación para otras garantías con sólo conocer la de garantía 0,8, habida cuenta de la sensible constancia del producto garantía por volumen regulado, dentro de la zona de valores prácticos, conforme señala el profesor Becerril.

VII. Comentarios sobre resultados obtenidos en las zonas meteorológicas estudiadas.

Los resultados se reflejan en las láminas 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Para las correlaciones A-P se empleó el tipo lineal por su sencillez y buen acuerdo con los puntos experimentales.

La zona meteorológica del Guadalquivir comprende la totalidad de la jurisdicción de la Confederación del mismo nombre, a excepción de las cuencas del Guadiana menor y Genil, protegidas por las cordilleras Sub-bética y Penibética, y en las cuales su régimen pluviométrico, más complejo, se diferencia de aquél del resto de la Confederación, determinado éste fundamentalmente por los vientos húmedos del Sudoeste. En ella, la ley es única tanto para aportación como para regulación, a pesar de la diferencia existente entre la geología de ambas márgenes que hacía pensar en una diferencia de permeabilidades. Es ésta en la única en que se llevó a cabo el estudio de las correlaciones A-P particulares de cada cuenca, y en las láminas 5 y 6 se ve que la variación de dichas leyes está de acuerdo con lo expuesto en el apartado V. Se señala como punto singular la cuenca alta del río Guadalimar (río Guadalmena), quizá por captar aguas de la zona muy permeable de los campos de Montiel, ya fuera de los límites de su cuenca topográfica, quizá por la influencia mediterránea en aquella región.

La zona de los Pirineos, estudiada únicamente con fines comparativos, se limitó a las cuencas de la región de Lérida. Las leyes son únicas también. La ecuación de correlación A-P es "bastarda", por no corresponderse los períodos de registro de lluvia y aportaciones.

La zona meteorológica constituida por la vertiente Norte de la península, presenta dos subzonas: una, asentada sobre los terrenos ígneos o metamórficos de la región gallega, y otra, formada por el resto de las cuencas, de terrenos sedimentarios, diferenciadas por la mayor permeabilidad de estas últimas que se refleja en su menor escorrentía, y también mayor regularidad, explicada por el efecto regulador de las aguas subálveas. Los puntos correspondientes a las estaciones de aforo

de una subzona aparecen netamente diferenciados de aquéllos de la otra, si bien en la subzona gallega el número de tales puntos es tan reducido que no permite el trazado de la interpolatriz, a no ser guiados por la interpolatriz de la otra subzona. Aparecen como singularidades la del río Oria, justificada por la fuga de agua hacia la cuenca del río Araquil, y la del Narcea, cuyos puntos son intermedios a las leyes de las subzonas por ser cuenca híbrida de terrenos metamórficos y sedimentarios. La ecuación de correlación *A-P* también es aquí "bastarda", por no poseerse datos de lluvia con garantía en el período de registro de las aportaciones.

En la vertiente Sur de las sierras de Gredos y Guadarrama se repite el fenómeno observado en el Norte, con la división de la zona en dos subzonas en correspondencia con las cuencas de los ríos Jarama y Alberche, siendo ahora el Jarama el que constituye la subzona permeable y, en consecuencia, con menor escorrentía y mayor regularidad. La importancia de las aguas subálveas de esta cuenca ya es conocida, como lo denotan las explotaciones que se hacen en la actualidad y los estudios más detenidos que sobre ella se realizan.

VIII. Ventajas que representa el procedimiento del estudio zonal.

En primer lugar, conviene recalcar el que, efectivamente, en función exclusivamente de la lluvia media existen leyes zonales de aportaciones y regulación, como se probó con ejemplos anteriormente considerados, y con un campo de aplicación en muchos casos de extraordinaria amplitud, siendo lo extenso del campo de validez de las leyes una de las principales ventajas del método.

Otras ventajas se derivan del tratamiento uniforme que da a los diferentes embalses, facilitando así su comparación y la gran seguridad de los resultados, por apoyarse éstos no en un solo punto, sino en numerosos puntos experimentales contrastados entre sí.

El peligro de que al elegir una estación de aforo para extrapolar sus resultados en otra próxima a ella, resulte que ambas no son semejantes o que aquella presenta alguna singularidad, como pueden ser las fugas de agua a otras cuencas, o bien los datos erróneos de aforo, etc., no sólo deja de tener importancia aquí, sino que este procedimiento sirve para detectar tales singularidades y ponernos en vías de descubrir sus causas y analizar si en el caso estudiado se producen análogas anomalías. Frente a ese otro procedimiento de asimilación de la cuenca a otra próxima con datos de aforo, presenta también el estudio zonal la ventaja de su mayor precisión.